

T H E S E

présentée à l'Université de NANCY
pour obtenir le grade de Docteur ès Sciences Naturelles

COUVERTS FORESTIERS ET FACTEURS DU CLIMAT :
LEURS INTERACTIONS, CONSÉQUENCES ÉCOPHYSIOLOGIQUES
CHEZ QUELQUES RÉSINEUX

par

Gilbert AUSSENAC

présentée publiquement le 9 juin 1975 devant la Commission d'Examen

Membres du Jury

MM. Ph. DUCHAUFOUR

Président

R.J. BOUCHET

P. CACHAN

Assesseurs

J. PARDE

F. JACQUIN



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547402_0008

T H E S E

présentée à l'Université de NANCY
pour obtenir le grade de Docteur ès Sciences Naturelles

COUVERTS FORESTIERS ET FACTEURS DU CLIMAT :
LEURS INTERACTIONS, CONSÉQUENCES ÉCOPHYSIOLOGIQUES
CHEZ QUELQUES RÉSINEUX

par

Gilbert AUSSENAC

présentée publiquement le 9 juin 1975 devant la Commission d'Examen

Membres du Jury

MM. Ph. DUCHAUFOUR

Président

R.J. BOUCHET

P. CACHAN

Assesseurs

J. PARDE

F. JACQUIN

1975

Reçu de la Bibliothèque de la Faculté de Sciences
à la date du 10/10/75

COUVERTURE FORESTIERE ET FACTEURS DU CLIMAT
LEURS INTERACTIONS. CARACTÉRISTIQUES ÉCARTILLAGÉES
CARTES NUMÉRIQUES DÉTAILLÉES

UNIVERSITE DE NANCY I



Présenté par le service de la Bibliothèque de la Faculté de Sciences

Le 10/10/75

101	75	DOCHTER
8.1	BOUCHET	
1.	CALHAN	
1.	FRIDE	
7.	JACQUIN	

S O M M A I R E

- <u>AVANT-PROPOS</u>	P. 7
- <u>INTRODUCTION</u>	P. 10
- <u>PREMIERE PARTIE : ETUDE DES INFLUENCES DU COUVERT FORESTIER SUR QUELQUES FACTEURS CLIMATIQUES</u>	P. 14
I. <u>GENERALITES</u>	
II. <u>EFFET DU COUVERT FORESTIER SUR LA TEMPERATURE DE L'AIR ET DU SOL</u>	P. 19
A. Introduction	
B. Méthodes d'étude	
C. Influence du couvert sur la température de l'air	
D. Influence du couvert sur les indices actinothermiques	
E. Influence du couvert sur la température du sol	
F. Profils thermiques dans quelques types de couvert	
G. Conclusion	
III. <u>EFFET DU COUVERT FORESTIER SUR L'EAU</u>	P. 44
A. Le cycle de l'eau en forêt	
B. Influence du couvert sur les précipitations	P. 45
1. Méthodes d'étude	
a - Mesure des précipitations tombant sur les peuplements (Pi)	
b - Mesure des précipitations arrivant directement au sol (Pg)	
c - Mesure de l'écoulement le long des troncs (Pt)	
2. Cas des couverts fermés	
a - Précipitations arrivant directement au sol	
1 - Etude générale du phénomène	
2 - Influence de l'essence : cas des feuillus et résineux	
3 - Influence de la densité	
4 - Influence de l'âge	

b - Ecoulement le long des troncs	P. 66
1 - Etude générale du phénomène	
2 - Influence de l'essence	
3 - Influence de la densité	
4 - Influence de l'âge	
c - Interception des précipitations	P. 73
1 - Etude générale du phénomène	
2 - Influence de l'espèce	
3 - Influence de la densité	
4 - Influence de l'âge	
3. Cas des peuplements ouverts	P. 78
a - Les peuplements éclaircis	
b - La clairière	
c - Cas des bandes forestières	
4. Conclusion	
C. L'évapotranspiration en forêt	P. 88
1. Généralités	
2. Méthode d'étude utilisée	
3. Fluctuation des nappes perchées dans les placettes étudiées	
4. Variation de l'humidité des sols des placettes étudiées	
5. Evaluation de l'évapotranspiration réelle (ETR) des parcelles étudiées	
6. Discussion et conclusion	
D. Influence de quelques composantes du cycle hydrologique (redistribution au sol des précipitations et évapotranspiration réelle)	P.114
1. Relations avec l'espèce et la structure des peuplements	
2. Relation avec les phénomènes pédogénétiques	
3. Conclusion	

- DEUXIEME PARTIE : ETUDE DE L'INFLUENCE DES FACTEURS MICROCLIMATIQUES P.122
SUR LE DEVELOPPEMENT ET LA CROISSANCE DE QUELQUES
JEUNES RESINEUX

I. INTRODUCTION

II. LE DEBOURREMENT

P.125

A. Méthode d'étude

B. Résultats

1. Evolution des différents stades phénologiques du débourrement
2. Relation du débourrement avec la température
3. Conclusion

III. LA CROISSANCE

P.135

A. Méthodes d'étude

B. Evolution de la croissance chez les différentes espèces étudiées

1. Influence globale du milieu
 - a - La croissance en hauteur
 - b - La croissance en diamètre
2. Influence de la température
 - a - Méthodes d'étude
 - b - Détermination des seuils apparents de végétation
 - c - Expression de la croissance en hauteur en fonction des sommes de température
 - d - Conclusion
3. Influences séparées de la lumière et de l'eau
 - a - Croissance en hauteur
 - b - Croissance en diamètre
 - c - Conclusion

IV. L'APPAREIL FOLIAIRE

P.165

A. Méthodes d'étude

B. Effet du microclimat sur la morphologie des aiguilles

1. Sur les dimensions et la forme des aiguilles
2. Sur le nombre et la dimension des stomates

C. Effet sur la structure des aiguilles

D. Effet du microclimat sur l'angle d'insertion des branches

E. Discussion et conclusion

V. <u>CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DE L'ECOPHYSIOLOGIE DE <i>Abies alba</i>, <i>Abies nordmanniana</i>, <i>Picea abies</i> et <i>Pseudotsuga menziesii</i></u>	P.185
A. Introduction	
B. <i>Abies alba</i>	
C. <i>Abies nordmanniana</i>	
D. <i>Picea abies</i>	
E. <i>Pseudotsuga menziesii</i>	
F. Conclusion	
- <u>TROISIEME PARTIE : CONSEQUENCES SYLVICOLES</u>	P.191
I. <u>INTRODUCTION</u>	
II. <u>LES TECHNIQUES DE REGENERATION NATURELLES OU ARTIFICIELLES</u>	
A. Protection contre les gelées	
B. Amélioration de la croissance	
III. <u>AMENAGEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS BOISES</u>	
- <u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	P.204
- <u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	P.214
- <u>ANNEXES</u>	P.228

AVANT PROPOS

L'étude intégrée des interactions du couvert forestier et des facteurs climatiques est encore très peu développée. Conscient de l'intérêt de ce problème pour la compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers, je me suis attaché à développer depuis 1965 un programme de recherche cohérent à partir d'expérimentations de terrain et de travaux de laboratoire. Certes d'autres études auraient encore été souhaitables, mais une synthèse m'a déjà paru possible et eu égard à la valeur stimulante de tout travail d'ensemble, je n'ai pas cru devoir la différer tout en souhaitant par d'autres travaux pouvoir à l'avenir en augmenter et en améliorer les conclusions.

Avant d'entreprendre l'exposé des résultats de mes recherches, je tiens à exprimer mes très sincères remerciements à Monsieur le Professeur P. DUCHAUFOUR, Directeur du Centre de Pédologie Biologique qui malgré ses multiples occupations a bien voulu accepter de présider le jury de thèse.

Monsieur J. PARDE, Directeur de Recherches à l'INRA, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production a suivi de particulièrement près la progression de mes travaux; convaincu de l'intérêt de mes recherches, il n'a cessé de me conseiller et de m'aider très efficacement, me faisant profiter de sa connaissance de la forêt et de sa grande compétence en sylviculture. C'est à son contact quotidien que j'ai pu mener à bien ce travail. Pour tout cela et pour la confiance qu'il m'a toujours témoignée, je le remercie bien vivement.

Mes très sincères remerciements vont aussi à Monsieur E.F. DEBAZAC, Directeur de Projet à la F.A.O. qui, alors qu'il dirigeait la Station d'Ecologie Forestière, m'a permis d'aborder ce domaine de recherche si passionnant qu'est la bioclimatologie forestière.

Ma reconnaissance va à Monsieur R.J. BOUCHET, Directeur de Recherches au département de Bioclimatologie de l'INRA qui a suivi mes travaux et qui par ses critiques et ses suggestions m'a fait profiter de sa très grande compétence en bioclimatologie.

Mes très sincères remerciements vont aussi à Monsieur P. CACHAN, Professeur à l'ENSAIA de Nancy qui a bien voulu accepter de juger mon travail et m'a éclairé de sa vaste expérience en bioclimatologie et en écologie.

Que Monsieur F. JACQUIN, Professeur à l'ENSAIA de Nancy veuille bien trouver ici l'expression de mes remerciements pour avoir bien voulu accepter de faire partie du jury.

Je remercie Monsieur P. BOUVAREL, Inspecteur Général de la Recherche Agronomique, Chef du Département de Recherches Forestières à l'INRA, pour sa bienveillante sympathie pendant la réalisation de cette thèse.

Le traitement statistique de la plupart des données de ce travail a été effectué par la Station de Biométrie du CNRF. Je remercie le personnel de cette Station et tout particulièrement Monsieur CL. MILLIER.

Je prie aussi mes camarades du CNRF d'accepter mes remerciements très cordiaux; Monsieur H. OSWALD pour les fructueux échanges d'idées en matière de sylviculture; Messieurs BONNEAU et LE TACON pour leur aide dans l'interprétation des problèmes de pluviolèssivage; Messieurs DECOURT, DELABRAZE et BOUCHON pour leurs renseignements et leurs avis.

Je tiens à remercier le personnel technique et administratif de la Station de Sylviculture et de Production du CNRF et tout particulièrement Messieurs DESJEUNES et WILLM de la Section de Bioclimatologie forestière qui ont été associés très étroitement à mes travaux. Par le sérieux de leur travail, ils ont rendu possible la réalisation de cette étude .

Je remercie l'Institut National de la Recherche Agromique qui m'a donné les moyens matériels de réaliser cette thèse.

Enfin, bien qu'il ne me soit pas possible de citer un par un tous ceux qui, de près ou de loin m'ont apporté leur aide, je voudrais cependant qu'ils soient assurés de ma reconnaissance.

COUVERTS FORESTIERS ET FACTEURS DU CLIMAT :
LEURS INTERACTIONS, CONSEQUENCES ECOPHYSIOLOGIQUES
CHEZ QUELQUES RESINEUX,

INTRODUCTION

La forêt où le promeneur non averti ne voit qu'un ensemble plus ou moins homogène d'arbres est en réalité une biocoenose immense dont le fonctionnement complexe est réglé par les rapports de la communauté des êtres vivants entre eux et avec leur environnement. Ainsi apparaît la notion d'écosystème. Avec la grande diversité de ses types naturels ou aménagés par l'homme, la forêt représente un écosystème particulièrement important dans la nature. La formalisation de cette notion d'écosystème et le développement des recherches dans ce domaine sont relativement récents. Aussi peu d'écosystèmes sont connus en détail à l'heure actuelle. Durant ces dernières années, sous l'égide du Programme Biologique International (P.B.I.), différentes équipes de chercheurs ont entrepris l'analyse détaillée de quelques écosystèmes forestiers.

Dans la plupart des cas, ces programmes ont été orientés vers des études de productivité biologique : étude des cycles biogéochimiques (DUVIGNEAUD, DENAYER 1971) et des flux d'énergie (GALOUX 1971) qui traversent l'écosystème. On peut admettre avec P. DUVIGNEAUD que le véritable fondateur de cette science de la production biologique fut le physiologiste danois BOYSEN-JANSEN qui, dès 1910 proposa les concepts de base. Par la suite, des mesures de la photosynthèse brute par la méthode des échanges gazeux de CO₂ ont été réalisés notamment par POLSTER (1950), TRANQUILLIN (1954) KOCH (1957). Enfin, ces dernières années des travaux importants ont été entrepris dans de nombreux pays du monde. De grands projets intégrés ont été développés citons par exemple en Europe Occidentale le projet Solling (ELLENBERG 1971), l'étude d'une chênaie mélangée calcicole à Virelles-Blâmont en Haute-Belgique (FROMENT et al 1971) et l'étude d'un peuplement de chêne vert (Quercus ilex L.) dans la région méditerranéenne française (LOSSAINT, RAPP. 1971).

Dans bien des cas, en raison de la complexité des mécanismes, les recherches ont du être limitées à l'analyse d'un écosystème forestier en état d'équilibre apparent, c'est-à-dire à un moment précis de son existence. Or, en réalité, un écosystème forestier est toujours en évolution dans le temps et dans l'espace. Il est alors extrêmement important d'envisager le fonctionnement de cette biocoenose de façon dynamique pour arriver à une compréhension d'ensemble.

La forêt est souvent considérée, à juste titre d'ailleurs, comme d'abord productrice de bois. Il faut bien reconnaître qu'elle est créatrice d'une matière première très utile à l'homme et qu'elle est étroitement liée à l'histoire de l'humanité. Il est permis de penser, au moment où les sources d'énergie et de matière première prennent une importance exceptionnelle, que longtemps encore, le rôle de production de bois de la forêt restera essentiel. L'utilisation rationnelle des produits de sa productivité primaire ne fait peut être d'ailleurs que commencer. Mais la forêt joue bien d'autres rôles : citons par exemple ses influences sur le cycle hydrologique naturel. Toutes ces réflexions montrent bien, que l'étude du fonctionnement de la forêt ne doit pas se cantonner à l'analyse de la productivité primaire d'un écosystème statique.

La sylviculture dont l'origine remonte à un lointain passé, a montré que l'utilisation saine de la forêt nécessitait une exploitation méthodique et raisonnée. Ainsi l'homme "sans le savoir" a été mêlé depuis très longtemps au problème du fonctionnement de cette biocoenose complexe. Il s'est alors constitué progressivement, de façon empirique, une technique forestière.

Pour nous, le fonctionnement de la forêt doit être envisagé à partir de l'interaction du couvert forestier avec les facteurs du climat. Dans cette interaction, nous distinguons d'une part l'influence de la forêt sur ces facteurs (notion de microclimat) et d'autre part la réponse des arbres aux facteurs microclimatiques.

Dans la plupart des cas, ces deux aspects du problème ont été étudiés séparément, suivant en cela le développement de la météorologie forestière. Nous pouvons citer par exemple en France les travaux de MATHIEU (1865), FAUTRAT (1878), HUFFEL (1888), CUIF (1907-1909) à l'étranger SCHUBERT (1900). Après cette première phase, on peut noter les travaux plus récents de KITTRELGE (1948), ROUSSEL (1953), VEZINA (1960), KRECMEYER (1960), GEIGER (1965), CONSTANTINESCU (1968).

Souvent, les influences de la forêt ont été envisagées de façon statique sans faire intervenir les éléments essentiels que sont la structure et la variation naturelle ou artificielle de cette structure. Il était alors difficile d'avoir une vue d'ensemble du fonctionnement dynamique de la forêt. D'un autre côté, le comportement des arbres et plus particulièrement des jeunes régénérations n'a été étudié qu'en relation avec les facteurs du climat (lumière, eau, etc.), souvent en laboratoire et en tous cas sans relation directe avec les facteurs microclimatiques qui résultaient de l'influence même du couvert forestier sur le climat général. Il s'en est suivi alors des difficultés pour interpréter correctement l'écophysiologie du développement et de la croissance des arbres forestiers.

Notre hypothèse de travail et notre thèse est qu'il est nécessaire dans ce domaine de prendre en compte ces deux aspects fondamentaux dans leur interaction afin d'améliorer la compréhension du fonctionnement dynamique des écosystèmes forestiers. La figure n° 1 illustre cette idée en représentant l'interaction forêt $\longleftrightarrow$ climat. Cette dernière doit être envisagée à toutes les échelles, aussi bien au niveau de la feuille que de l'arbre, du peuplement et même du massif forestier. Ce type de recherche vient ainsi compléter les analyses statiques entreprises par quelques équipes de chercheurs multidisciplinaires.

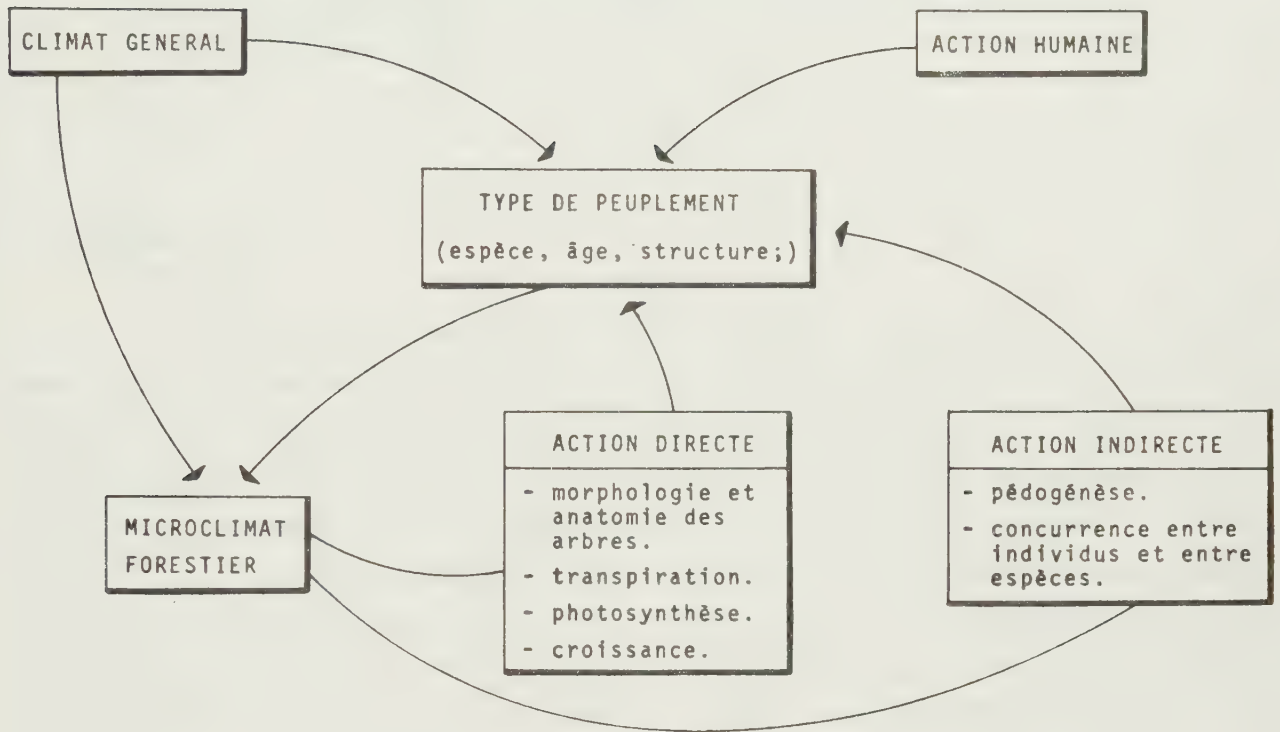
Dans les chapitres qui vont suivre, nous essayerons de donner une illustration aussi claire que possible de nos idées.

Dans une première partie, nous montrerons comment le microclimat forestier résulte de l'influence modificatrice du couvert sur le climat général. Nous prendrons en exemple deux facteurs climatiques particulièrement importants : la température et l'eau.

Dans une deuxième partie, nous étudierons de quelle façon le microclimat ainsi formé, agit sur la croissance et le développement des jeunes arbres. Enfin, rassemblant les résultats présentés dans les deux premières parties, nous montrerons l'intérêt de la connaissance de l'interaction forêt $\longleftrightarrow$ climat pour la technique sylvicole et l'art d'aménager le milieu naturel.

FIGURE 1

REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'INTERACTION FORET-CLIMAT.



_ PREMIERE PARTIE

ETUDE DES INFLUENCES DU COUVERT FORESTIER SUR QUELQUES FACTEURS CLIMATIQUES

I. GENERALITES

Le couvert forestier exerce une influence notable sur les facteurs climatiques à tel point que l'on parle de microclimats forestiers. Les influences que la forêt exerce sur le climat relèvent d'abord du type de climat (PAVARI 1962) mais aussi du type de peuplement. L'espèce et la structure du couvert jouent aussi un rôle déterminant dans ces phénomènes. Ainsi le microclimat que l'on observe à l'intérieur d'un peuplement dépend au premier chef de ce peuplement : c'est-à-dire de la répartition spatiale et de l'importance des masses végétales. Réciproquement, l'organisation de la structure du couvert est corrélée avec des profils microclimatiques. Il y a donc en quelque sorte un état d'équilibre entre la répartition des masses végétales et les profils microclimatiques. Cet "état d'équilibre" relève à la fois des potentialités génétiques de l'espèce, de la structure des peuplements et des caractéristiques du sol et du climat.

Ainsi, la connaissance des influences du couvert sur les facteurs climatiques revêt une importance particulière pour la compréhension du fonctionnement d'ensemble de la forêt. Nous verrons dans la deuxième partie de ce travail les conséquences de ces phénomènes pour le développement et la croissance de jeunes régénérations.

Dans cette première partie de notre travail, nous parlerons "température et "eau". En effet, ces deux facteurs décisifs règlent l'existence des forêts et des types auxquels elles se rattachent. Les autres facteurs climatiques tels que le rayonnement solaire et le vent ont été mesurés dans certaines de nos expérimentations pour compléter l'interprétation des phénomènes mais cependant nous n'avons pas fait d'études particulières à leur sujet, aussi, nous ne les traiteront pas dans des chapitres particuliers.

Notre travail a été réalisé en Lorraine :

- forêt domaniale d'Amance (Meurthe-et-Moselle) : chênaie - hêtraie entrecoupée de plantations résineuses à 12 km au Nord-Est de Nancy sur marnes liasiques (altitudes 250 m).
- forêt domaniale de Haye (Meurthe-et-Moselle) : hêtraie sur plateau calcaire (altitude 350 m) à l'ouest de Nancy.
- forêt communale d'Epinal (Vosges) : hêtraie sur grès vosgien (altitude 350 m) et aussi dans le Perche : forêt domaniale de Bellême (Orne) futaie de chêne rouvre sur argile à silex (altitude 220 m) (*Figure n°2*).

Nous avons utilisé des peuplements à couvert fermé (résineux et feuillus), mais aussi des peuplements transformés par des opérations sylvicoles conduisant à une ouverture importante du couvert forestier (coupe rase, clairière, bandes forestières). Les peuplements ont tous une structure simple : futaie à un seul étage. La clairière et les bandes forestières ont été réalisées de même dans des peuplements homogènes de manière à fournir ainsi des structures simples et régulières. A ce sujet, nous avons préféré travailler à partir de situations écologiques bien définies que nous avons créées afin de les caractériser plus facilement, et éventuellement pouvoir les reproduire.

Le tableau n° 1 donne les caractéristiques générales des différentes situations écologiques et peuplements pris en compte dans notre travail. Afin de situer climatologiquement nos parcelles d'expérimentations, nous donnons dans la figure n° 3 la répartition mensuelle de la pluviométrie et de la température moyenne à Bellême, Epinal et Nancy.

FIGURE 2

SITUATION GENERALE DES STATIONS ETUDIEES.



TABLEAU N° 1

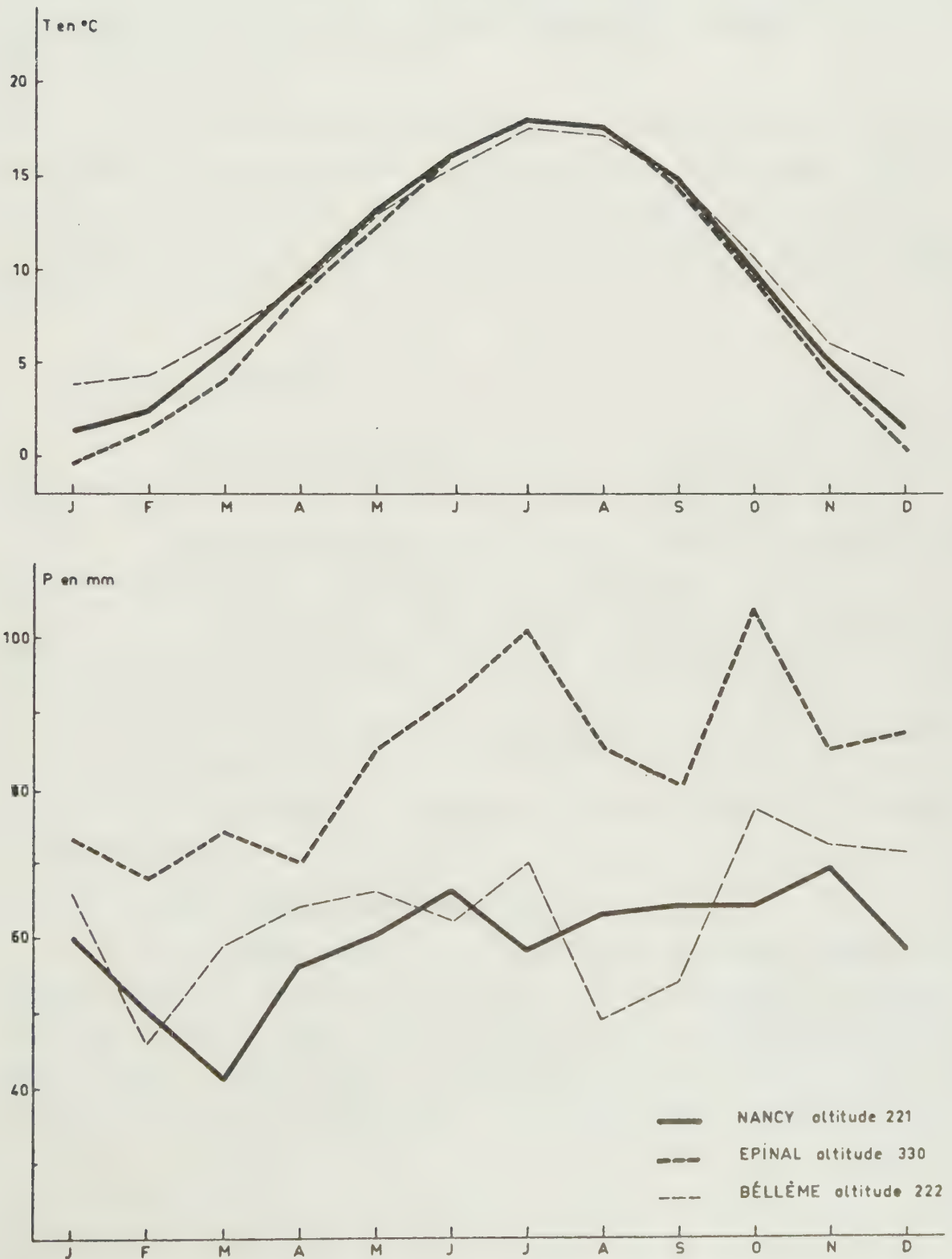
 CARACTERISTIQUE DES DIFFERENTES SITUATIONS ECOLOGIQUES
 ET PEUPLEMENTS ETUDIES

ESPECES	SITUATIONS FORETS: A,H,B,E,(a)	AGE (ans)	HAUTEUR (m)	DENSITE tiges/ha	DIMENSION (m) ou SURFACE (ha)
PEUPLEMENTS FORESTIERS FERMES.					
<i>Abies grandis</i> Douglas Lindt.	F.A.	33	23,0	620	0,03 ha
<i>Picea abies</i> L. (Karsten)	F.A.	24	12,5	2160	0,02
<i>Pinus silvestris</i> L.	F.A.	29	13,6	1520	0,05
<i>Fagus silvatica</i> L.	F.A.	30	12,5	1300	0,06
<i>Fagus silvatica</i> L. (I)	F.H.	130	32,6	375	0,20
<i>Fagus silvatica</i> L. (II)	F.H.	130	33,0	230	0,20
<i>Fagus silvatica</i> L. (III)	F.H.	80	15,5	993	0,15
<i>Fagus silvatica</i> L. (IV)	F.H.	45	13,1	2583	0,18
<i>Fagus silvatica</i> L.	F.A.	130	32,0	300	0,25
<i>Quercus sessiliflora</i> Sm.	F.A.	100	25,0	500	0,25
PEUPLEMENTS FORESTIERS FERMES DE DENSITE VARIABLE					
<i>Pseudotsuga menziesii</i> Mirb(I)	F.A.	15	11,7	1484	0,1
<i>Pseudotsuga men.</i> (II) Mirb.	F.A.	15	11,1	4265	0,1
<i>Pseudotsuga menz</i> (III) Mirb.	F.A.	15	11,7	2310	0,1
<i>Pseudotsuga men.</i> Mirb. (IV)	F.A.	15	11,8	1118	0,1
PEUPLEMENTS FORESTIERS ECLAIRCIS					
<i>Quercus sessiliflora</i> Sm (I)	F.B.	160	35,0	102	1,4
<i>Quercus sessiliflora</i> Sm (II)	F.B.	160	35,0	120	1,4
<i>Quercus sessiliflora</i> Sm (III)	F.B.	160	35,0	121	1,2
<i>Quercus sessiliflora</i> Sm (IV)	F.B.	160	35,0	339	0,8
SITUATIONS ECOLOGIQUES RESULTANT D'UNE OUVERTURE IMPORTANTE DU COUVERT FORESTIER					
- Coupe rase	F.A.	-	-	-	11,0
- Coupe rase	F.E.	-	-	-	30,0
- Clairière circulaire (1)	F.A.	-	13,0	-	Ø 26m
- Coupe d'abri (2)	F.A.	30	13,0	1300	0,06
- Bande forestière (3)	F.E.	-	12,0	-	40m x 170m
- Bande forestière (3)	F.E.	-	12,0	-	12m x 170m

(a) A : Forêt d'Amance (54); H : Forêt de Haye (54); B : Forêt de Bellême (61);
E : Forêt d'Epinal (88).

- (1) Dans un peuplement feuillu issu de taillis: hêtre 4/10, charme 3/10, tilleul 1/10, divers 2/10.
 (2) Dans un peuplement feuillu issu de taillis et de régénération naturelle :
hêtre 4/10, charme 3/10, tilleul 1/10, divers 2/10.
 (3) Dans un peuplement feuillu issu de taillis: chêne 5/10, charme 3/10, hêtre 1/10, divers 2/10.

FIGURE 3
CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES GENERALES DES STATIONS
ETUDIEES : BELLEME (MOYENNE 1901-1930)
EPINAL (MOYENNE 1891-1930)
NANCY (MOYENNE 1921-1950)



II. EFFET DU COUVERT FORESTIER SUR LA TEMPÉRATURE DE L'AIR ET DU SOL

A. INTRODUCTION

La température de l'air et du sol sont fortement influencées par le couvert forestier. Mais la nature du couvert par sa structure et son importance joue un rôle déterminant dans ces phénomènes et explique les profils thermiques qui peuvent être observés.

Nous avons entrepris des recherches sur ces influences dans un certain nombre de stations types de l'est de la France : peuplements fermés, clairière, coupe rase, coupe d'abri, coupe par bande (voir dans le tableau n° 1 les caractéristiques de ces stations) ; le but est d'arriver à une compréhension globale des influences de la structure du couvert sur le microclimat thermique.

B. METHODES D'ETUDES

Les études entreprises ont porté sur l'analyse de profils thermiques verticaux et sur des mesures comparatives dans plusieurs stations.

- La température de l'air. Elle a été mesurée à différents niveaux au-dessus du sol, grâce à plusieurs types d'appareils :

- thermomètre à lecture directe : thermomètre à maxima et thermomètre à minima (mesures effectuées sous abri climatologique de type Anglais ou abri "Piche" simplifié).

- thermocouples Cuivre-Constantan de très petites dimensions installés à l'air libre.

- thermomètre à résistance de Platine (100Ω à 0°C) installés dans des abris ventilés.

- Les indices actinothermiques

La température de l'air est bien sûr un facteur important pour les végétaux, mais l'on sait que dans bien des cas, la température du végétal (feuilles, bourgeons) peut être très différente de la température de l'air. Ainsi, pendant la nuit, quand le rayonnement net est inférieur à zéro, la température d'une surface végétale peut être notablement inférieure à la température

de l'air. L'écart peut atteindre plusieurs degrés. Les études qui ont été effectuées par plusieurs auteurs (GESLIN 1939 ; DURAND 1965) ont montré que la température d'un bourgeon par exemple, pouvait être évaluée correctement à l'aide d'un thermomètre à minima placé dans la même position que lui.

BRAZIER et EBLE (1935) ont proposé de donner à la température relevée sur le thermomètre placé à l'air libre le nom : d'indice actinothermique. Afin d'étudier justement l'influence du couvert sur la température ~~notre~~ des végétaux forestiers (et plus particulièrement les jeunes plants), nous avons effectué une série de mesure d'indices actinothermiques.

- La température du sol a été mesurée à plusieurs niveaux grâce à deux types d'appareils :

- des thermomètres à lecture directe (thermomètre à maxima et thermomètre à minima) ;
- des thermocouples Cuivre-Constantan.

Pour connaître l'influence de la forêt sur le microclimat thermique, il faut bien entendu étudier les températures maxima et les températures minima qui peuvent déterminer les accidents climatiques. A partir de ces deux températures, il est possible de calculer la température moyenne. On détermine en général cette influence en comparant deux stations : l'une située en plein découvert et l'autre en forêt. D'où des difficultés : si les deux stations sont choisies à bonne distance l'une de l'autre, on court le risque que les climats locaux soient de toute façon différents, par contre, si on les rapproche trop, on peut redouter que l'influence de la forêt s'étende jusqu'à la station de plein découvert. On estime à l'heure actuelle qu'il faut se placer à 20 fois la hauteur d'un obstacle pour éviter toute influence. Dans notre cas, afin d'améliorer les comparaisons, nous avons retenu uniquement des stations situées en terrain plat. La station de plein découvert était située à 400 m environ des peuplements étudiés.

C. INFLUENCE DU COUVERT SUR LA TEMPERATURE DE L'AIR

En forêt, comme au-dessus d'un sol nu, la répartition des températures est différente le jour et la nuit. Mais, dans un peuplement forestier, le profil thermique se complique, car les masses végétales : feuillage, branches, troncs qui absorbent et émettent le rayonnement sont distribués de façon variable. On peut ainsi faire apparaître le rôle des peuplements forestiers qui peuvent être considérés comme "sources" ou "puits" pour les échanges d'énergie et de masse.

Le couvert forestier échange continuellement de l'énergie avec le milieu ambiant. Dans la journée, le bilan radiatif est positif, les apports d'énergie étant supérieurs aux pertes. La nuit, c'est le contraire, car le rayonnement solaire direct et diffus a disparu, seul existe le rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde, inférieur au rayonnement inverse des végétaux.

Le bilan radiatif peut s'écrire dans la journée

$$(1) \quad R_n = (1 - a) R_g + R_a - \sigma T^4$$

R_n = rayonnement net

a = albedo du couvert

R_g = rayonnement global : rayonnement direct et diffus de courte longueur d'onde ($< 5\mu$).

R_a = rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde ($> 5\mu$).

σT^4 = rayonnement du corps noir. Le couvert forestier est ici assimilé à un corps noir.

σ = constante de Boltzmann-Stefan

T = température absolue en ° Kelvin.

La nuit, il vient :

$$(2) \quad R_n = R_a - \sigma T^4.$$

L'émissivité de l'atmosphère et sa température étant inférieures à celles du sol, $R_a < \sigma T^4$ et le rayonnement net $R_n < 0$.

D'une façon générale, dans la journée les couronnes du peuplement absorbent une partie du rayonnement direct et diffus et chauffent l'air ambiant. Les recherches que nous avons menées dans le peuplement de Pin Sylvestre signalé dans le tableau n° 1 (AUSSENAC 1967), montrent bien que les températures les plus élevées se produisent au niveau des couronnes. Le matin, le maximum de température se situe au sommet des houppiers, puis il descend à l'intérieur des couronnes et dans le courant de l'après-midi, il remonte dans les cimes. A titre d'exemple, on peut étudier la journée du 12 Août 1966 (ensoleillée - vent faible) :

- à 8 heures, maximum de température au niveau supérieur des couronnes (1) (niveau 4) 17,0° C.

- à 13 heures, maximum au niveau 3 (29° C).

- à 19 heures, 28,4° C maximum de température remonté au niveau 4.

Dès le soir, il y a refroidissement dans les couronnes, par contre les sommets des houppiers sont encore soumis au rayonnement direct et diffus. Il y a également refroidissement au niveau de la strate herbacée. Sous les couronnes, les températures augmentent du sol vers le haut : c'est l'inversion de température.

Nous avons pu constater que, à chaque niveau, dans le peuplement, le maximum journalier de température ne se produit pas à la même heure. Le maximum se produit plus tôt aux niveaux 1 - 2 et 3 qu'en 4. Ainsi, par exemple, le 10 Août 1966 (journée très ensoleillée, vent faible), il s'est produit à 12 heures en (1) : 23,8° C, à 13 heures en (2) : 25,7° C, à 14 heures en (3) : 26,8° C et à 15 heures en (4) : 27,0° C. On peut expliquer ce phénomène en remarquant que c'est dans le milieu de la journée que le rayonnement solaire pénètre dans le peuplement mais que les cimes sont touchées plus longtemps et plus tard dans l'après-midi.

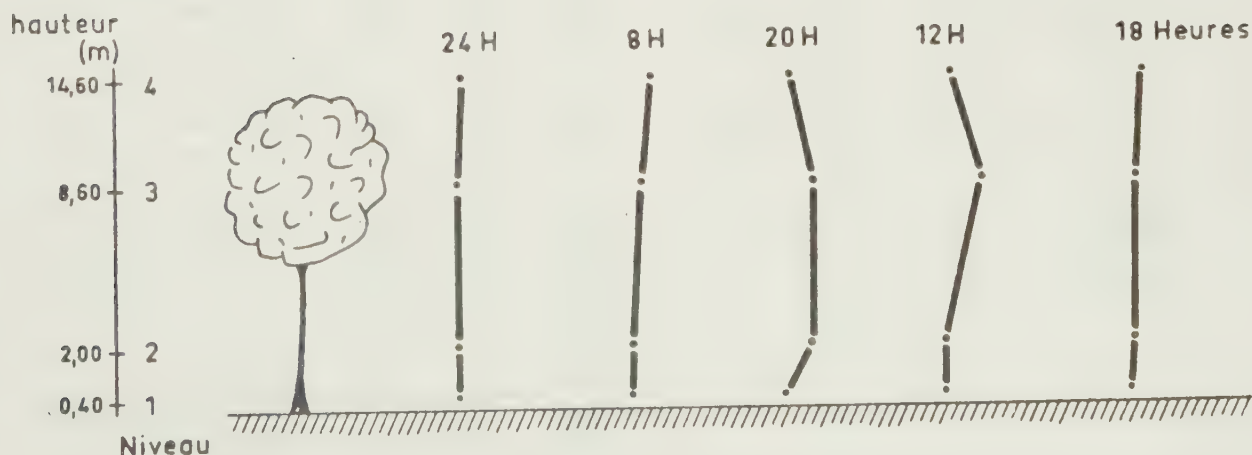
(1) Dans le peuplement étudié, le niveau 4 est situé à 14,60 m au-dessus du sol, le niveau 3 à 8,60 m, le niveau 2 à 2,00 m et le niveau 1 à 0,40 m. La hauteur moyenne du peuplement est de 13,60 m. (Photographie n° 1)

L'abaissement nocturne de température dû au rayonnement net (R_n) est d'autant plus fort qu'aucun obstacle ne se trouve entre les organes végétaux et le ciel ; aussi, après le coucher de soleil, on observera un refroidissement important au niveau des cimes. Ces derniers jouent alors le rôle de "sol effectif". Dans le cas du rayonnement à partir de la strate herbacée, les couronnes interviennent fortement et freinent le refroidissement nocturne des végétaux et par voie de conséquence de l'air ambiant. Nous verrons par la suite l'importance de ces phénomènes pour les gelées tardives (conséquences sylvicoles).

En fin de compte, nous avons pu observer dans notre peuplement un profil diurne et un profil nocturne bien caractérisés (1). On notera que SELTZER (1935) avait trouvé des profils identiques dans un peuplement de chêne. De façon schématisée, pendant la phase active de la végétation et pour des journées de beau temps peu venté, les profils suivants peuvent être retenus (figure n° 4) (température croissant vers la droite). En hiver, le schéma précédent n'est pas souvent réalisé. Souvent, il peut exister au niveau de la strate herbacée un "sol effectif secondaire".

FIGURE 4

VARIATION SCHEMATIQUE DES PROFILS THERMIQUES DANS UN PEUPEMENT DE PINS SYLVESTRES.



(1) Par temps pluvieux ou venté, ces profils s'uniformisent.

Sous le couvert, la température de l'air dépend de l'importance et de la structure des houppiers. Une étude comparative a été menée dans plusieurs stations de la forêt d'Amance et de la forêt d'Epinal. La température a été mesurée à 1,50 m de hauteur sous abri. Les données présentées dans les tableaux annexes n° 1, 2, 3 permettent de se rendre compte de l'influence du couvert. Les températures maxima sont dans l'ensemble plus élevées dans la coupe rase que dans les autres traitements, aussi bien en été qu'en hiver. On remarque d'une façon générale que c'est sous le peuplement de Picea abies que les températures maxima sont les plus basses, que cela soit en hiver ou en été ; viennent ensuite par ordre croissant abies grandis, la coupe d'abri, Pinus sylvestris, la clairière et enfin la coupe rase. Ce classement reflète bien l'importance du couvert. Pour la coupe d'abri, pendant la période défeuillée, l'influence du couvert est moindre, ainsi que l'on peut le voir sur les tableaux 2 et 3.

TABLEAU N° 2

COMPARAISON DES TEMPERATURES ANNUELLES MOYENNES DE L'AIR DANS DIFFERENTS TRAITEMENTS

ANNEE	TEMPERATURE	COUPE RASE	COUPE D'ABRI	CLAIRIERE	ABIES GRANDIS	PICEA ABIES	PINUS SILVESTRI	OBSERVATIONS
1967	Moy. Max.	16,1	14,5	15,6	14,4	14,1	14,9	Moyenne
	Moy. min.	6,2	7,0	6,8	6,8	6,5	6,6	sur
	Moy. moy.	11,1	10,7	11,2	10,6	10,3	10,8	9 mois
1968	Moy. Max.	12,7	11,3	12,2	11,1	10,9	11,9	
	Moy. min.	4,9	5,6	5,3	5,4	5,6	4,9	
	Moy. moy.	8,8	8,5	8,8	8,3	8,3	8,4	
1969	Moy. Max.	14,5 *	13,0 *	13,9 *	12,7 *	12,5 *	13,6 *	*
		12,7	11,4	12,2				Moyenne
	Moy. min.	6,0 *	6,6 *	6,3 *	6,4 *	6,1 *	6,1 *	sur
		4,8	5,3	5,1				10 mois
1970	Moy. moy.	10,2 *	9,8 *	10,1 *	9,6 *	9,3 *	9,9 *	
		8,8	8,4	8,7				
	Moy. Max.	14,0	12,4	13,6				
1971	Moy. min.	4,1	4,9	4,7				
	Moy. moy.	9,0	8,6	9,2				
Période 1967/ /1971	Moy. Max.	14,0	12,4	13,6				
	Moy. min.	4,1	4,9	4,7				
	Moy. moy.	9,0	8,6	9,2				
Période 1967/ /1971	Moy. Max.	13,1	11,7	12,7				
	Moy. min.	4,6	5,3	5,1				
	Moy. moy.	8,9	8,5	8,9				

TABLEAU N° 3

COMPARAISON DES TEMPÉRATURES MOYENNES DE L'AIR DANS DIFFÉRENTS TRAITEMENTS

(Moyennes sur la période 1967-1971)

MOIS	TEMPERATURE	COUPE RASE	COUPE D'ABRI	CLAIRIERE
JANVIER	Maximum	<u>3,6</u>	2,9	3,2
	Minimum	- <u>2,0</u>	- 1,6	- 1,7
	Moyen	0,8	0,6	<u>0,8</u>
FEVRIER	Max.	<u>4,2</u>	3,8	<u>4,2</u>
	Min.	- <u>1,4</u>	- <u>1,0</u>	- <u>1,2</u>
	Moy.	1,4	1,4	<u>1,5</u>
MARS	Max.	7,7	7,3	7,7
	Min.	0,0	0,3	- 0,1
	Moy.	3,8	3,8	3,8
AVRIL	Max.	<u>13,5</u>	13,0	13,4
	Min.	<u>3,2</u>	<u>3,9</u>	3,6
	Moy.	8,4	<u>8,5</u>	<u>8,5</u>
MAI	Max.	<u>18,1</u>	16,2	17,7
	Min.	<u>7,3</u>	<u>8,1</u>	7,8
	Moy.	12,7	12,1	<u>12,8</u>
JUIN	Max.	<u>20,3</u>	18,0	19,9
	Min.	<u>9,9</u>	<u>10,7</u>	10,5
	Moy.	15,1	<u>14,4</u>	<u>15,3</u>
JUILLET	Max.	<u>23,7</u>	20,9	23,2
	Min.	<u>11,9</u>	<u>13,0</u>	12,8
	Moy.	17,8	17,0	<u>18,0</u>
AOÛT	Max.	<u>22,6</u>	20,0	21,6
	Min.	<u>11,5</u>	<u>12,6</u>	12,4
	Moy.	<u>17,0</u>	<u>16,3</u>	<u>17,0</u>
SEPTEMBRE	Max.	<u>19,4</u>	16,9	18,0
	Min.	<u>8,8</u>	9,9	9,6
	Moy.	<u>14,1</u>	13,4	13,8
OCTOBRE	Max.	<u>15,1</u>	13,2	14,1
	Min.	<u>6,2</u>	<u>7,0</u>	6,8
	Moy.	<u>10,7</u>	10,1	10,5
NOVEMBRE	Max.	<u>7,6</u>	6,7	7,3
	Min.	<u>1,9</u>	<u>2,3</u>	2,1
	Moy.	<u>4,8</u>	4,5	4,7
DECEMBRE	Max.	<u>1,9</u>	1,4	1,7
	Min.	- <u>2,1</u>	- <u>1,8</u>	- 2,0
	Moy.	- <u>0,1</u>	- 0,2	- 0,2
ANNEE	Max.	<u>13,1</u>	11,7	12,7
	Min.	<u>4,6</u>	<u>5,3</u>	5,1
	Moy.	<u>8,9</u>	8,5	8,9

Les températures minima sont dans l'ensemble plus faibles dans la coupe rase que dans les autres traitements étudiés. On remarquera cependant une exception en 1968 au moment du changement de saison : avril (hiver ~~—~~ été), novembre (été ~~—~~ hiver). Ce résultat pourrait indiquer un effet d'inertie du couvert forestier mais comme il n'est pas confirmé, les autres années il n'est pas possible de conclure dans ce sens.

Sous le couvert, l'abaissement des températures maxima s'explique par l'effet d'écran des houppiers, il en est de même mais en sens inverse pour le relèvement des températures minima.

L'écart (température maximum - température minimum) qui rend compte de la "rigueur" du microclimat est toujours le plus élevé dans la coupe rase qui présente ainsi le climat le plus contrasté ou "continental".

Les températures moyennes sont (tableaux n° 2 et 3) plus faibles dans les peuplements que dans la coupe rase. La clairière par contre, a une température moyenne voisine du plein découvert.

Des observations identiques aux nôtres avaient déjà été faites par MATHIEU (1865), par contre FAUTRAT (1878) et CUIF (1919) présentaient des résultats différents en ce qui concerne les températures minima (1). Nous verrons par la suite, le rôle de la strate herbacée dans l'établissement des profils thermiques. Plus récemment, des résultats voisins des nôtres ont été publiés par SCHNOCK (1967).

(1) Il est très possible que les résultats obtenus par ces deux derniers auteurs s'expliquent par la présence dans les peuplements d'une strate herbacée qui a pu influencer les températures minima.

Nous avons vu que dans la clairière, la température de l'air était influencée par le couvert environnant, mais qu'elle se rapprochait de la température du plein découvert. On peut se demander ce qu'il en est dans les bandes forestières qui représentent des clairières très allongées. L'expérience que nous avons menée en forêt d'Epinal (*figure n° 5*) est intéressante à cet égard. Elle nous a montré que dans ce cas, par rapport à la coupe rase, les températures maxima étaient relevées, alors que les températures minima étaient abaissées : les écarts pouvant atteindre 1° C (*voir tableau n° 4*). Il en résultait selon les postes de mesure des températures moyennes plus élevées ou plus faibles qu'en découvert. Des observations analogues sont rapportées pour des brise-vents par divers auteurs (GUYOT, 1964) ayant travaillé en climats tempérés humides.

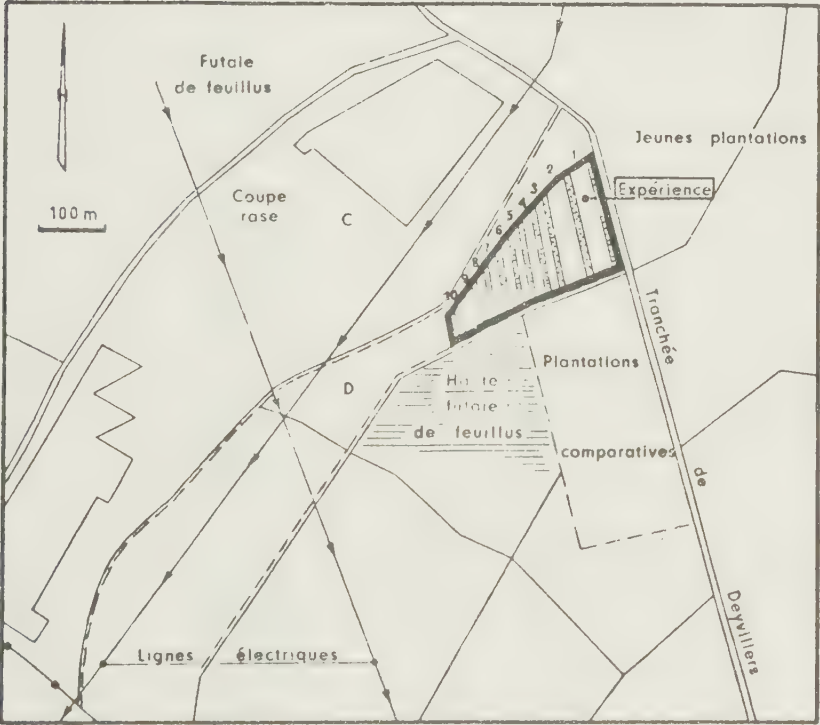


FIGURE 5
SITUATION DU DISPOSITIF
EXPERIMENTAL EN FORET
D'EPINAL.

Position des
postes de mesure dans
les différentes bandes.
Les bandes et les postes
sont numérotés d'est en
ouest.

Número de la bande	B 1		B 2				B 3		B 4		B 6		B 7	
Numero du poste	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Distance à la lisière ouest (en m)	18,8	38,8	33,9	20,1	8,8	0,8	7,0	11,6	6,6	1,1	10,6	5,6	1,1	7,0

TABEAU N° 4

TABEAU COMPARATIF DES BANDES : TEMPÉRATURE MAXIMUM MOYENNE θ M, TEMPÉRATURE MINIMUM MOYENNE θ m, TEMPÉRATURE MOYENNE $\bar{\theta}$ DANS LES DIFFÉRENTS POSTES POUR LES PÉRIODES D'ÉTUDE

EMPLACEMENT	PERIODE DU 14 AU 30.4.1971			PERIODE DU 1 AU 20.5.1971			PERIODE DU 29.7 AU 1.9.1971		
	θ M °C	θ m °C	$\bar{\theta}$ °C	θ M °C	θ m °C	$\bar{\theta}$ °C	θ M °C	θ m °C	$\bar{\theta}$ °C
COUPE RASE	18,3	<u>1,7</u>	<u>10,0</u>	21,7	6,4	14,0	23,9	10,0	16,9
B1 Poste n°1	18,4	1,4	9,9	22,3	6,0	<u>14,2</u>	<u>25,0</u>	9,7	17,3
Poste n°2	18,4	<u>1,7</u>	10,0	21,9	<u>6,5</u>	<u>14,2</u>	24,3	<u>10,2</u>	17,2
Poste n°3	18,5	1,3	9,9	22,0	6,1	14,0	24,3	9,8	17,0
B 2 Poste n°4	18,4	1,4	9,9	22,3	6,0	<u>14,2</u>	24,1	9,4	16,7
Poste n°5	18,8	1,1	9,9	22,2	5,7	13,8	24,7	9,2	16,9
Poste n°6	17,7	0,9	9,3	21,5	5,7	13,6	22,8	9,5	16,1
B 3 Poste n°7	18,9	1,0	9,9	22,2	5,6	13,9	24,1	9,7	16,9
Poste n°8	<u>19,2</u>	0,9	<u>10,0</u>	22,5	5,7	14,1	24,7	9,7	17,2
B 4 Poste n°9	18,9	1,0	9,0	22,2	5,6	13,9	24,8	10,1	<u>17,4</u>
Poste n°10	17,8	1,1	9,4	22,1	5,7	13,9	23,4	10,0	16,7
Poste n°11-	18,6	0,6	9,6	<u>22,7</u>	5,4	14,0	24,7	10,1	17,4
B 6 Poste n°12	18,5	0,5	9,5	22,5	5,4	13,9	24,7	10,0	17,3
Poste n°13	17,9	0,4	9,1	21,6	5,3	13,4	22,8	9,8	16,3
B 7 Poste n°14	19,0	0,0	9,5	22,4	4,7	13,5	24,4	9,6	17,0

Ce phénomène d'augmentation des températures maxima et d'abaissement des températures minima peut être attribué à l'affaiblissement de la vitesse du vent. Il en résulte alors une "stagnation" de l'air et par suite, une stratification plus importante des couches d'air. En découvert, par contre, le vent favorise les échanges et les mélanges de ces différentes couches. Les figures n° 6, 7 et 8 montrent pour les bandes, les variations des écarts de température par rapport à la coupe rase. Elles montrent aussi les variations des autres paramètres climatiques. Les températures ont été mesurées à 1,50 m de hauteur, ce qui atténue fortement l'influence de la couverture de la surface du sol.

Si l'on compare la clairière et la bande, on remarque que dans les deux cas, la vitesse du vent est ralentie, mais il existe une différence importante, c'est le frein au refroidissement (nocturne) ou à l'échauffement (diurne) qu'exercent les houppiers des arbres environnant la clairière. Dans le cas de la bande (150 m de longueur), l'influence des houppiers est faible. Il existe aussi des possibilités d'échange entre la clairière et le peuplement environnant. Dans les bandes, l'épaisseur des interbandes n'est pas suffisante pour assurer ce rôle de "réservoir tampon". Le type de temps intervient fortement sur les phénomènes d'échange. Si le vent est faible ou nul, la clairière fonctionne indépendamment du peuplement voisin, il n'en est pas de même si le vent est fort.

Il faut ajouter à ces considérations que de toute façon, si les dimensions de la clairière augmentent, on se retrouve dans le cas des bandes. Nous verrons par la suite l'importance de ces phénomènes pour la sylviculture (gelées tardives).

FIGURE 6

VARIATION DES PRINCIPAUX PARAMETRES CLIMATIQUES DANS LES BANDES (bande n°4) EN FORET D'EPINAL.

Précipitations, évaporation, vent en % des valeurs de la coupe rase. Température maximale et minimale : écarts par rapport à la coupe rase.

MOYENNES POUR LA PERIODE DU 14 AU 30-4-74.

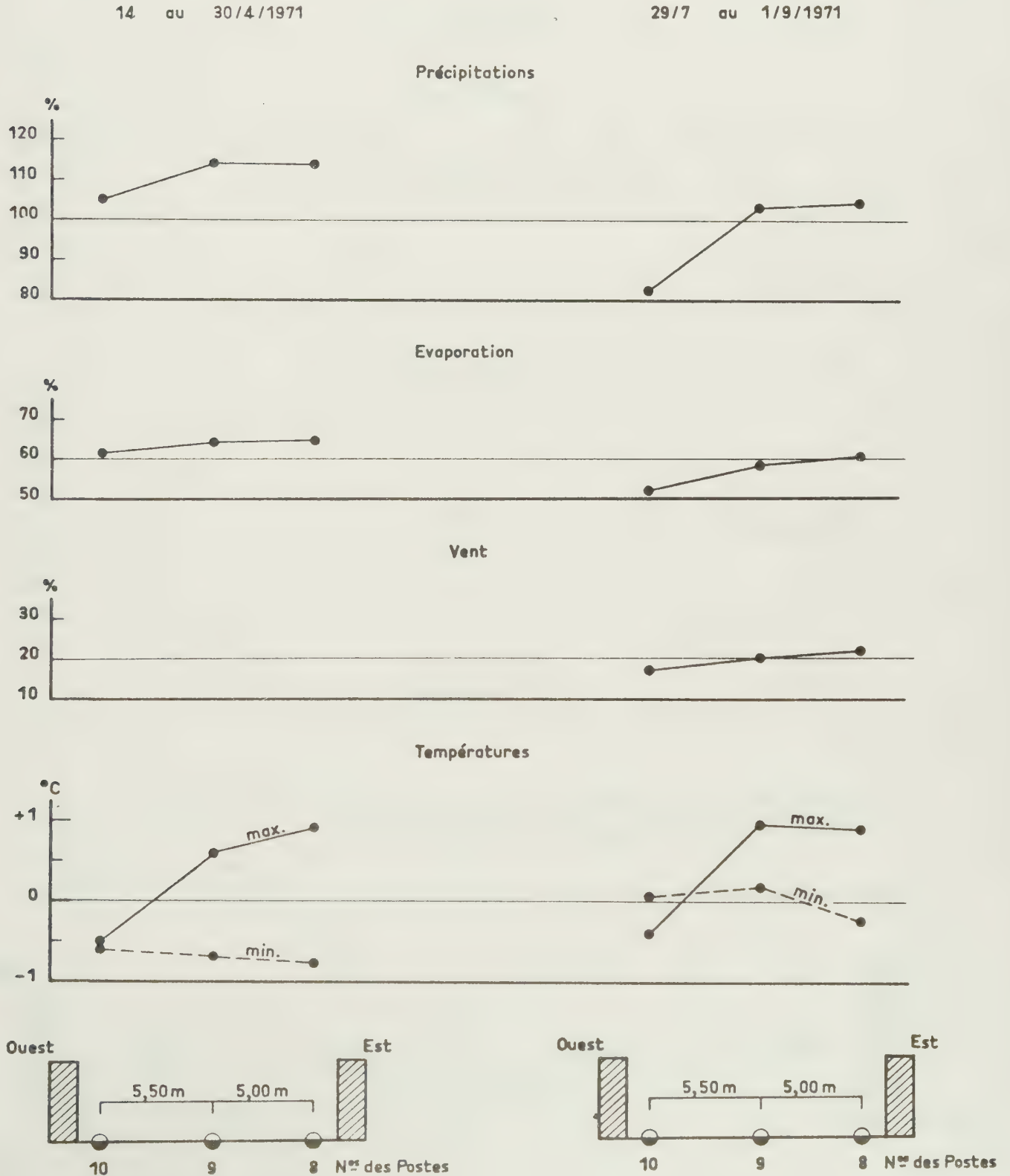


FIGURE 7

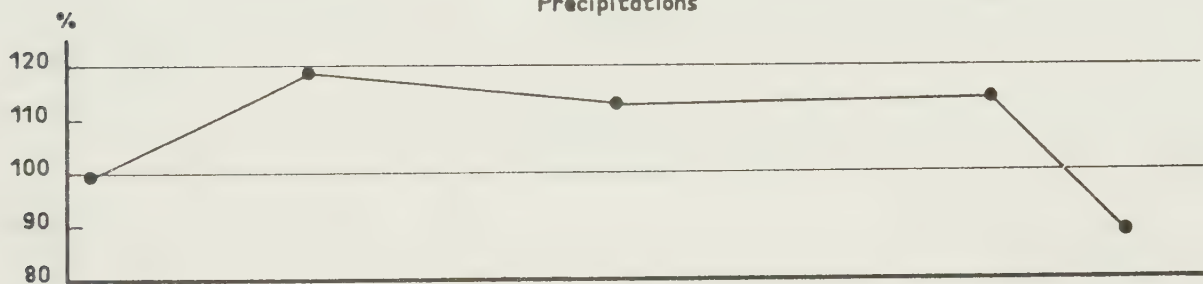
VARIATION DES PRINCIPAUX PARAMETRES CLIMATIQUES DANS LES BANDES (bande n°2) EN FORET D'EPINAL.

Précipitations, évaporation, vent en % des valeurs de la coupe rase. Température maximale et minimale : écarts par rapport à la coupe rase.

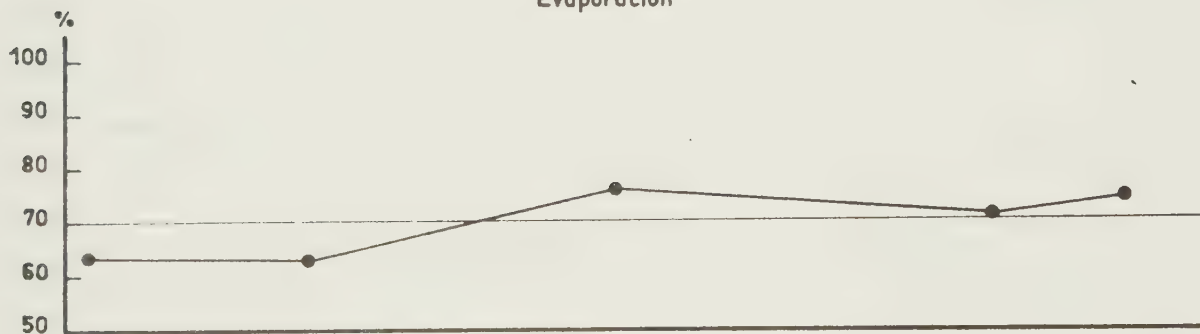
MOYENNES POUR LA PERIODE DU 14 AU 30-4-74.

14 au 30/4/1971

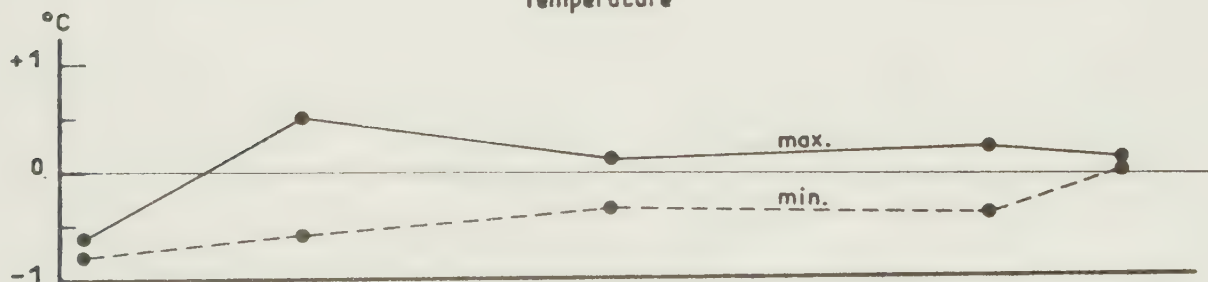
Précipitations



Evaporation



Température



Ouest

Est

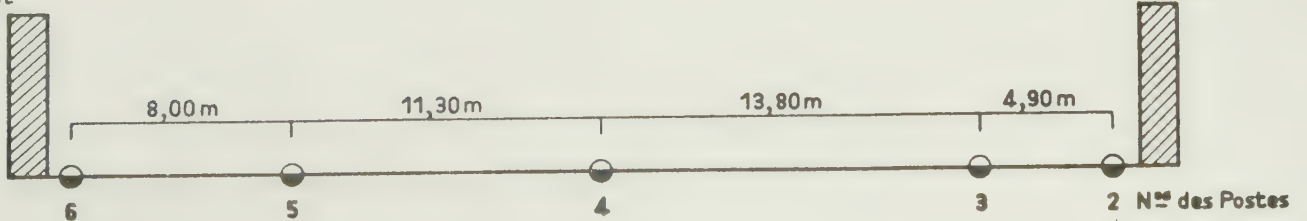


FIGURE 8

VARIATION DES PRINCIPAUX PARAMETRES CLIMATIQUES DANS LES BANDES (bande n°2) EN FORET D'EPINAL.

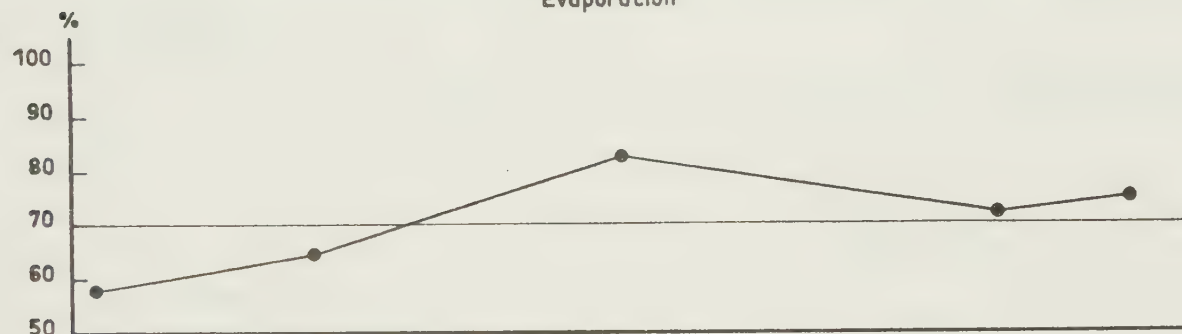
Précipitations, évaporation, vent en % des valeurs de la coupe rase. Température maximale et minimale : écarts par rapport à la coupe rase.

MOYENNES POUR LA PERIODE DU 29-7 AU 1-9-71.

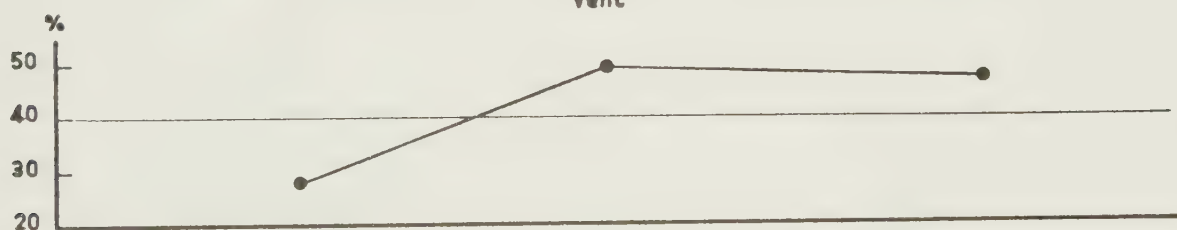
Précipitations



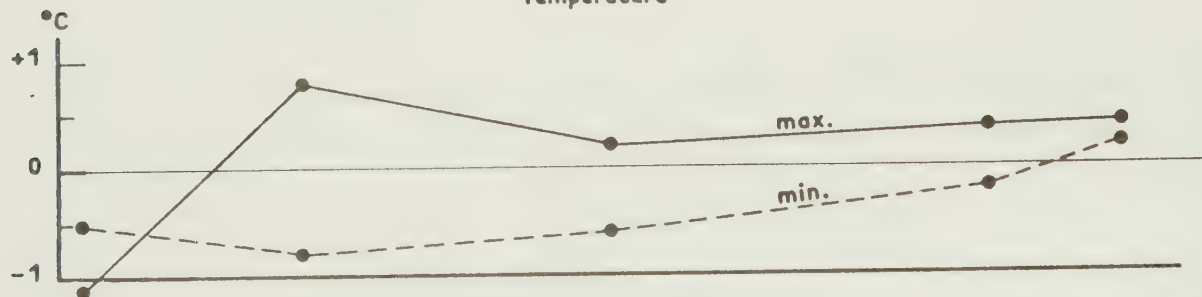
Evaporation



Vent



Température



D. INFLUENCE DU COUVERT SUR LES INDICES ACTINOTHERMIQUES.

Jusqu'ici, nous n'avons considéré que la seule température de l'air. Mais, nous avons vu précédemment qu'il était possible d'approcher la température nocturne des organes végétaux en utilisant les indices actinothermiques. Nous avons effectué une étude comparative des indices actinothermiques à plusieurs niveaux dans les différentes stations déjà étudiées pour la température de l'air. Les tableaux *annexes* n° 4, 5 et 6 rapportent les moyennes mensuelles obtenues. Il apparaît très clairement que les indices actinothermiques sont les plus faibles dans la coupe rase. La clairière dans ses différentes situations (1) : Nord, Sud, Est, Ouest et Centre se rapproche de la coupe rase, mais présente quand même des valeurs significativement plus élevées.

En Avril 1968, par exemple, on observe à 40 cm de hauteur :

	IA 40 Cm	Ecart à la coupe rase
- Coupe rase	1,4° C	
- Coupe d'abri (2)	2,8	+ 1.4
- Clairière Nord	2,5	+ 1.1
- Clairière Sud	2,4	+ 1.0
- Clairière Centre	2,6	+ 1.2
- <u>Abies grandis</u>	3,6	+ 2.2
- <u>Picea abies</u>	3,6	+ 2.2
- <u>Pinus sylvestris</u>	3,4	+ 2.0

On peut aussi, à titre d'exemple, analyser les indices actinothermiques pour une journée de gelée au printemps : le 4 Mai 1967 (AUSSENAC 1968)

(1) Il s'agit de la situation de l'emplacement. Ainsi, par exemple clairière-Nord correspond à la partie de la clairière qui est au Nord et qui donc exposé au Sud.

(2) Coupe d'abri réalisée dans un peuplement feuillu.

Le relevé des indices actinothermiques à 20 cm est le suivant :

<u>Coupe rase</u>	<u>Clairière Nord</u>	<u>Clairière Sud</u>	<u>Clairière Est</u>	<u>Clairière Ouest</u>	<u>Clairière Centre</u>	<u>Coupe d'abri</u>
- 2,5°	0,0	0,0	1,0	0,8	0,8	1,0

L'effet du peuplement dans le cas des feuillus se manifeste de façon très nette quand le couvert est feuillé, il existe aussi pendant la période défeuillée mais de façon moins marquée.

E. INFLUENCE DU COUVERT SUR LA TEMPERATURE DU SOL.

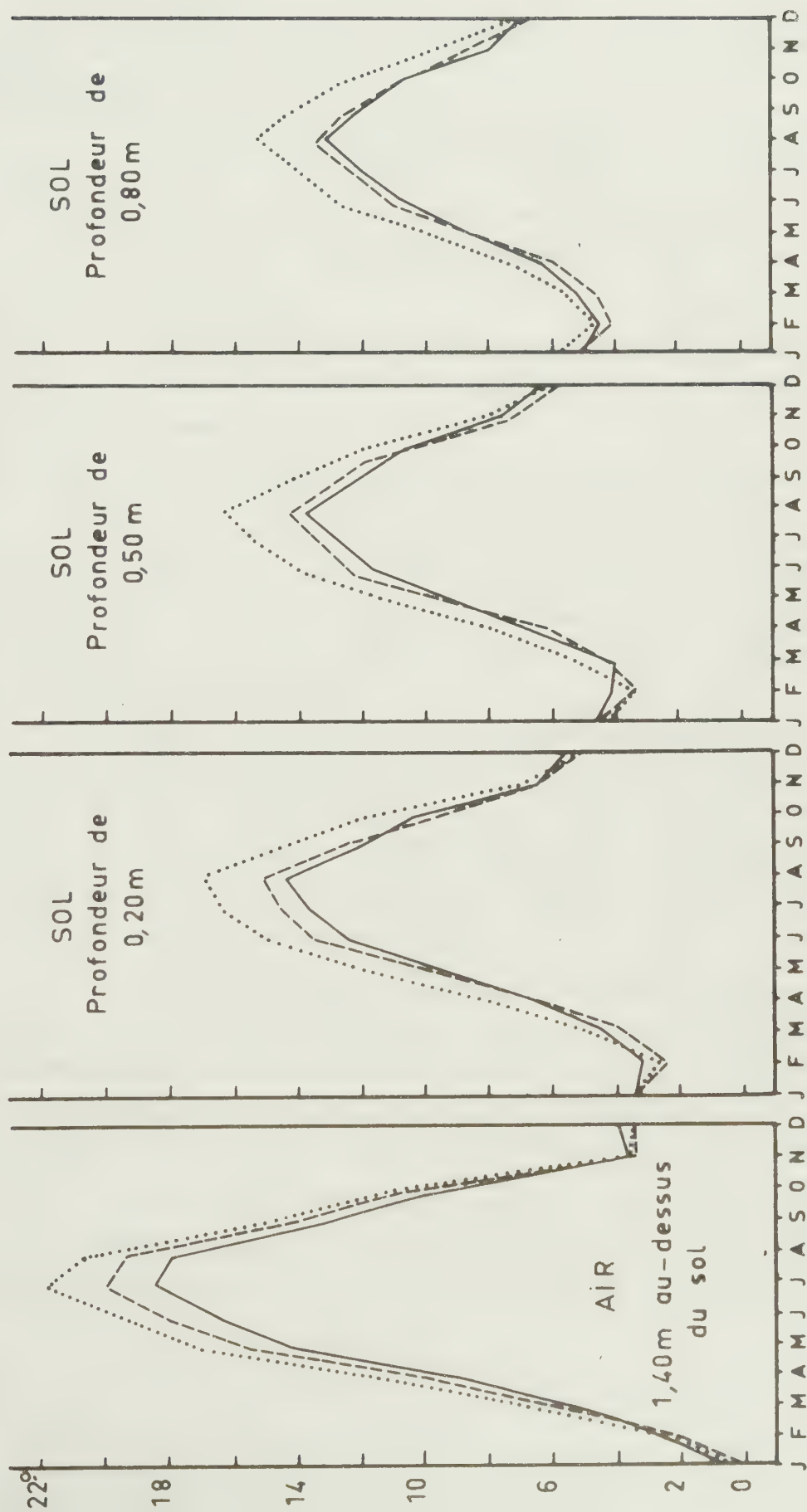
D'une façon générale, on admet que sous nos climats le sol forestier est plus chaud en hiver et plus frais en été que le sol découvert. Ce phénomène est sensible jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 80 à 100 cm.

La figure n° 9 extraite des travaux de CUIF (1913) montre ce qui a pu être observé dans un peuplement de Sapin pectiné (Abies alba), dans une place de chablis, c'est-à-dire dans une clairière, occasionnée par la chute de quelques arbres, et à découvert.

Des différences existent à toutes les profondeurs étudiées et à - 20 cm elles peuvent aller jusqu'à 3° 5 en Juillet, 1° 4 en Janvier entre le peuplement et le plein découvert.

Dans notre travail, nous avons effectué un certain nombre de mesures dans la coupe rase, la coupe d'abri et la clairière. Ainsi, pour des enregistrements effectués le 2 Décembre 1969, pendant une période froide. On remarque qu'à - 10 cm, la température dans la coupe d'abri est supérieure à la température dans la clairière et dans la coupe rase. A - 30 cm, les températures dans la coupe d'abri et la clairière sont voisines alors que la température de la coupe rase est inférieure d'environ 0,6° C. A - 60 cm, la température est la même dans les 3 traitements.

FIG. 9 VARIATION ANNUELLE COMPAREE DES TEMPERATURES DE L'AIR ET DU SOL D'APRES LES MOYENNES MENSUELLES DES QUATRE ANNEES DE 1909 à 1912. Forêt Domaniale des Elieux (M et M.)



— Sous-bois sapin des Vosges "Abies alba Mill."

--- Dans une place de chablis

..... Hors bois

D'après CUIF (1913)

En été, l'analyse d'une journée, le 13-7-70 par exemple, donne les résultats suivants :

- . à - 60 cm, la température du sol varie entre 12 et 13° C dans la coupe d'abri, 14° 5 et 15° 7 dans la coupe rase.
- . à - 30 cm, on relève des températures fluctuant entre 14° 2 et 18,7 ° dans la coupe d'abri, 15° 5 et 20° C dans la coupe rase.
- . à - 10 cm, on relève des températures fluctuant entre 15° 5 C et 20° C dans la coupe d'abri ; 14,2° C et 19,7° C dans la coupe rase.

On voit apparaître ici le rôle tampon du couvert forestier.

Le tableau n° 5 donne les résultats d'une étude comparative (Avril 1973 - Mai 1974) effectuée en forêt d'Amance et concernant la température maximum et minimum à 5 cm de profondeur au poste climatologique d'Amance (sous sol gazoné) dans une hêtraie et dans une chênaie voisines. Les résultats sont démonstratifs :

- en plein découvert, les températures maxima sont plus élevées que sous couvert pratiquement toute l'année. Les températures minima par contre, sont plus élevées en été, mais plus faibles en hiver. On remarque que la chênaie (essence de lumière) paraît avoir une influence différente de celle de la hêtraie (essence d'ombre), sans qu'il soit possible d'ailleurs d'en préciser exactement le sens.

En été, les écarts température maximum - température minimum sont beaucoup plus faibles à l'intérieur des peuplements qu'en plein découvert. Pour les températures moyennes, les écarts entre les peuplements et le poste climatologique atteignent 5° C en Juillet. En hiver, par contre, les écarts sont beaucoup plus réduits : quelques dixième de degrés seulement.

Il est intéressant de considérer ce qui se passe dans le cas du plein découvert, mais en terrain nu (tableau n° 5). Dans ce cas, les températures maxima sont plus élevées et les températures minima plus basses.

COMPARAISON DES TEMPÉRATURES DE SOL EN PLEIN DÉCOUVERT ET DANS DEUX PEUPELEMENTS (1973-1974)

PERIODE	PLEIN DECOUVERT					POSTE CLIMATOLOGIQUE					SOUS LA HETRAIE					SOUS LA CHENAIE				
	Températures sous abri					Températures sol nu					Températures sol gazonné (-5cm)					Températures sol (- 5 cm)				
	Max	Mini	Moy	Max	Mini	Moy	Max	Mini	Moy	Ecart θ max -θ mi.	Max	Mini	Moy	Ecart θ max -θ mi.	Max	Mini	Moy	Ecart θ max -θ mi.		
AVRIL 1973	12,7	1,8	7,3	10,3	3,8	7,0	9,5	5,3	7,4	4,2	7,1	3,3	5,2	3,8	7,3	3,7	5,5	3,6		
MAI	20,1	7,6	13,9	18,8	9,9	14,3	16,9	10,8	13,8	6,1	11,8	8,1	10,0	3,7	11,8	8,2	10,0	3,6		
JUIN	23,4	10,5	16,9	23,3	13,7	18,5	20,8	15,6	18,2	5,2	14,5	11,5	13,0	3,0	14,7	11,6	13,1	3,1		
JUILLET	23,3	11,7	17,5	23,9	16,0	19,9	21,9	17,2	19,5	4,7	15,8	13,3	14,5	2,5	16,2	12,6	14,4	3,6		
AOUT	25,9	12,8	19,3	24,4	15,7	20,0	22,0	17,5	19,7	4,5	16,9	14,9	15,9	2,0	17,5	14,1	15,8	3,4		
SEPT.	22,7	9,6	16,2	21,1	12,6	16,8	18,4	13,8	16,1	4,6	15,2	12,2	13,7	3,0	15,3	10,6	12,9	4,7		
OCTOBRE	14,3	4,4	9,4	12,4	5,5	8,9	12,0	7,7	9,8	4,3	9,6	7,0	8,3	2,6	9,6	6,1	7,8	3,5		
NOVEMB.	8,6	0,7	4,7	6,1	1,4	3,7	6,7	3,0	4,9	3,7	6,4	4,1	5,2	2,3	6,1	3,5	4,8	2,6		
DECEMB. 30 j.	3,9	-2,2	0,9	2,2	-0,7	0,7	2,7	0,4	1,5	2,3	2,9	0,5	1,7	2,4	2,6	0,3	1,4	2,3		
JANVIER 1974	7,9	1,8	4,9	5,2	0,8	3,0	4,7	1,7	3,2	3,0	4,9	2,2	3,5	2,7	4,7	1,7	3,2	3,0		
FEBVIER	7,9	0,9	4,4	5,2	0,1	2,6	4,7	1,2	2,9	3,5	4,7	2,4	3,5	2,3	4,6	1,2	2,9	3,4		
MARS	11,4	3,2	7,3	9,1	2,6	5,8	7,6	3,2	5,4	4,4	6,4	3,9	5,1	2,5	6,8	2,8	4,8	4,0		
AVRIL	16,3	2,8	9,6	15,1	3,9	9,5	12,1	5,8	8,9	6,3	9,4	6,6	8,0	2,8	9,6	5,3	7,4	4,3		
MAI	18,2	6,0	12,1	18,8	8,0	13,4	14,7	8,4	11,5	6,7	10,4	8,1	9,2	2,3	10,6	6,6	8,6	4,0		
MOYENNE	15,2	5,2	10,2	13,5	6,78	10,1	12,3	8,1	10,2	4,2	9,7	6,9	8,3	2,7	9,8	6,4	8,0	3,4		
AVRIL 73 - MAI 74																				

La comparaison peuplements - terrain découvert et nu ; peuplements donne évidemment des écarts beaucoup plus grands qu'avec le terrain couvert de gazon. Nous verrons par la suite que la connaissance de l'influence de la couverture herbacée est extrêmement importante pour pouvoir effectuer des comparaisons valables et aussi pour comprendre la biologie des végétaux qui se situent à ce niveau.

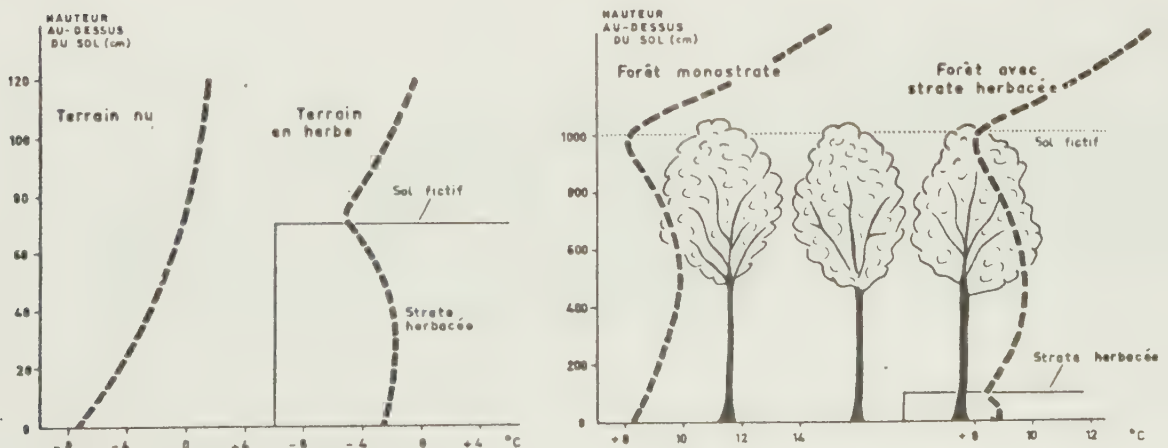
Nos résultats rejoignent ceux de CUIF. On peut conclure que l'influence du couvert sur la température du sol est réelle. Elle variera avec l'importance des houppiers, mais de toute façon, elle sera plus marquée en été qu'en hiver. Cette influence dépend de l'énergie (calories) à évacuer c'est-à-dire du rayonnement net. Or, R_n est dépendant du rayonnement global qui varie fortement avec la saison. Enfin, il faut tenir compte du rôle de la litière et de la couche d'humus.

F. PROFILS THERMIQUES DANS QUELQUES TYPES DE COUVERT.

Dans les paragraphes précédents, nous avons rendu compte d'une série d'études comparatives de la température de l'air et des indices actinothermiques dans divers peuplements, en clairière, coupe d'abri, coupe rase, bandes forestières. Nous avons effectué ces comparaisons à des hauteurs déterminées au-dessus du sol. Mais, en réalité, la distribution des masses végétales influence beaucoup l'établissement des profils, ainsi que nous l'avons montré dans le peuplement de Pins sylvestres. Il est donc extrêmement important pour la compréhension de ces phénomènes, de tenir compte de l'ensemble des végétaux qui composent la strate végétale : aussi bien des grands arbres que des végétaux herbacés. A l'aide de l'ensemble des résultats que nous avons obtenus, (AUSSENAC 1968, 1969, 1970, 1973), nous allons essayer de schématiser les profils types que l'on peut observer.

FIGURE 10

COMPARAISON SCHÉMATIQUE DES PROFILS DE TEMPÉRATURES NOCTURNES DANS 4 TYPES DE STATIONS : TERRAIN NU, TERRAIN ENHERBÉ, FORÊT MONOSTRATE ET FORÊT AVEC STRATE HERBACÉE.



Nous considérerons 4 cas types :

- le plein découvert avec sol nu
- le plein découvert avec un sol enherbé
- la forêt de structure simple : futaie sans sous-étage
ni strate herbacée
- la forêt de structure complexe : futaie avec strate herbacée.

- Cas du terrain découvert avec sol nu.

Dans la journée, la température la plus élevée s'observe au niveau de la surface du sol. Elle diminue quand on s'élève ou quand on pénètre dans le sol (*figure n° 10*). Dans la nuit, au contraire, le rayonnement net R_n de la surface du sol est négatif. La surface du sol présente de ce fait la température la plus basse. L'importance du refroidissement dépendra alors de l'humidité de l'air (1) et de la vitesse du vent.

En effet, si le vent souffle, il accroît les coefficients de transfert de la chaleur et il perturbe l'établissement du profil thermique par brassage des couches d'air. Il augmente ainsi le flux de chaleur venant de l'atmosphère qui compense les pertes par rayonnement de la surface du sol. Dans ce cas du sol nu, il existera une différence entre température de l'air et indice actinothermique mais les profils seront analogues.

.../

(1) On sait en effet que l'atmosphère, grâce à la vapeur d'eau et au CO_2 qu'elle contient, absorbe le rayonnement inférieur à 8μ et supérieur à 13μ . Au niveau de 10μ , il existe une "fenêtre" qui correspond au maximum du rayonnement. Du fait de cette absorption de l'infrarouge, les nuages émettent tels des corps noirs (ϵT^4) d'où une diminution du refroidissement du sol puisque au rayonnement atmosphérique R_a s'ajoute alors le rayonnement des nuages.

- Cas d'un terrain découvert enherbé.

Dans ce cas, il existe bien entendu un profil diurne et un profil nocturne. Mais, ces profils sont différents de ceux du terrain découvert et nu car la strate herbacée est constituée par des végétaux dont les surfaces absorbant et rayonnant l'énergie sont réparties sur une hauteur plus ou moins grande au-dessus du sol. De plus, le couvert végétal constitue un obstacle à la pénétration du rayonnement solaire dans la journée, durant la nuit, l'obstacle joue en sens inverse et intercepte le flux du rayonnement venant du sol. De tels phénomènes ont d'ailleurs été décrits par GESLIN (1958) et BOUCHET (1965).

Dans la strate herbacée, le profil thermique est relativement uniforme. Au cours de la journée, la température la plus élevée s'observera à la partie supérieure des végétaux. La nuit, la température la plus basse s'observe également à ce niveau.

La zone des températures les plus basses (nuit) ou les plus élevées (jour) qui, dans le cas du terrain découvert se situait à la surface du sol, est remontée en quelque sorte jusqu'au niveau de la végétation.

Dans le cas des profils nocturnes (*figure n° 10*), la température augmente au-dessus du couvert, mais à niveau égal, les températures sont inférieures à celles qui pourront être observées sur terrain dénudé.

La comparaison des profils de température sol nu/sol enherbé (*tableau n° 15*), montre bien que la strate herbacée joue le rôle de niveau isolant, particulièrement pendant les phases de refroidissement (nuits de gelée au printemps par exemple).

Pendant la phase nocturne dans la couverture végétale, les profils de température et les profils d'indice actinothermique sont voisins car le refroidissement des surfaces d'un niveau donné est freiné par les surfaces situées plus haut qui occultent le ciel. Mais, à la partie supérieure du couvert, les indices actinothermiques sont très nettement inférieurs à la température de l'air, car ici, les pertes de rayonnement sont très importantes ($R_n < 0$).

- Cas de la futaie sans sous-étage ni strate herbacée

Ce cas est celui que nous avons déjà étudié dans le peuplement de Pins sylvestres. On retrouve ici le rôle déterminant du sommet des houppiers. Dans la journée, les couronnes des arbres absorbent une partie importante du rayonnement direct et diffus et "chauffent" l'air ambiant ; de ce fait, comme nous l'avons déjà vu, les températures maximales se produisent à leur niveau. Dans la nuit, le refroidissement s'opère, les surfaces végétales se refroidissent d'autant plus qu'elles rayonnent librement (*figure n° 10*). Les températures les plus basses s'observent alors au niveau des couronnes. Un deuxième minimum existe au niveau du sol mais il est beaucoup moindre car le refroidissement est freiné par les couronnes qui occultent le ciel. SELTZER (1935) avait fait état des profils de ce type dans une chênaie.

- Cas de la futaie avec strate herbacée.

Ici, les profils se compliquent un peu. Le rôle prépondérant de la partie supérieure des houppiers n'a pas changé. Il y a seulement des modifications à l'intérieur du peuplement. Il apparaît (*figure n° 10*) au niveau supérieur de la strate herbacée des maxima et des minima secondaires de température.

On voit alors que dans le cas d'un peuplement complexe : pluri-stratifié (futaie, sous-étage et strate herbacée), les profils se rapprocheront de ceux que l'on observe dans le cas du terrain découvert enherbé. L'échelle des hauteurs est différente, mais on doit retrouver, dans ce cas, à la partie supérieure des houppiers, la zone où se situent à la fois les plus basses températures (minimum nocturne) et les plus élevées (maximum diurne). A l'intérieur du peuplement, les températures varieront peu d'un niveau à un autre.

En résumé, on doit savoir que pour étudier l'influence d'un peuplement forestier sur la température de l'air ou les indices actinothermiques, il est nécessaire de tenir compte du type de couverture végétale aussi bien en terrain découvert (référence) que pour un peuplement, sinon les comparaisons qui sont faites sont difficilement interprétables.

G. CONCLUSIONS

La température de l'air et la température du sol sont fortement influencées par la nature du couvert végétal. En relation avec l'importance et la structure de la végétation, nous avons pu établir des profils thermiques qui rendent compte de la distribution de la température de l'air au-dessus du sol. La nature des influences du couvert végétal pose alors le problème du retentissement de ces variations sur la biologie des végétaux en général et des arbres en particulier. Nous voyons ainsi par cet exemple, qu'il est nécessaire de se préoccuper de la réponse des arbres aux facteurs microclimatiques pour comprendre le fonctionnement d'ensemble d'un peuplement forestier. La connaissance des interactions climat $\longleftrightarrow$ forêt peut être utilisée par le forestier pour améliorer les conditions de végétation des arbres aux différents stades de leur existence. Nous verrons dans le chapitre : "Conséquences sylvicoles", l'intérêt de ces recherches pour la sylviculture.

L'interaction forêt $\longleftrightarrow$ climat que nous venons d'illustrer pour la température de l'air et du sol se manifeste aussi pour d'autre facteur du climat. Le facteur "eau" revêt une importance particulière. Nous allons l'étudier maintenant.

III. EFFET DU COUVERT FORESTIER SUR L'EAU

L'eau est un facteur essentiel pour la végétation forestière. On associe d'ailleurs souvent luxuriance de la couverture forestière et satisfaction des besoins en eau. L'importance et la répartition des précipitations sont effectivement des facteurs décisifs qui règlent avec la température l'existence des forêts et des types auxquelles elles se rattachent.

Inversement, la forêt exerce des influences notables sur le cycle hydrologique qui dépendent du climat mais aussi du type de peuplement. A partir d'un facteur climatique général "homogène" la forêt introduit une hétérogénéité dont le sens et l'importance dépendent de la nature (espèce, âge, structure) du couvert. C'est finalement de ce facteur d'hétérogénéité (dispersion des différents flux) que dépend le cycle de l'eau en forêt.

Ces influences retentissent aussi sur le fonctionnement de la forêt elle-même. Il est ainsi important d'envisager ces deux aspects du problème si l'on veut espérer comprendre les relations liant le facteur eau et la forêt. C'est dans cet esprit que nous allons traiter ce nouveau chapitre.

A. LE CYCLE DE L'EAU EN FORÊT

Les précipitations (P_i) qui tombent sur un peuplement forestier (*figure n° 11*) (AUSSENAC, 1970) rencontrent l'écran du couvert. Une partie de cette eau est interceptée (I_n) par les cimes et évaporée (1) ; le reste arrive au sol, soit directement (P_s), soit par écoulement le long des troncs (P_t). Une partie de l'eau qui atteint le sol peut ruisseler en surface (R) ou s'écouler par drainage superficiel latéral (drainage hypodermique) (F). Le surplus de l'eau nécessaire à l'alimentation du sol part en drainage profond (D).

(1) Il est probable qu'une certaine quantité d'eau est aussi absorbée par les feuilles, mais la mise en évidence de ce phénomène est difficile ainsi que la remarque RUTTER (1965).

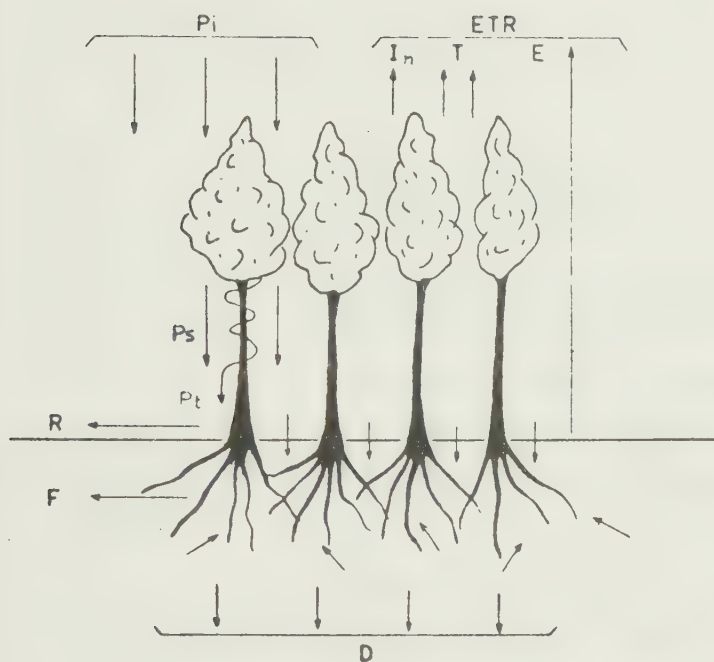


FIGURE 11
SCHEMA DU CYCLE DE L'EAU
EN FORET.

- Pi : Précipitations incidentes.
 In : Interception nette.
 Ps : Précipitations traversant directement.
 Pt : Ecoulement le long des troncs.
 R : Ruissellement en surface du sol.
 F : Drainage latéral superficiel.
 D : Drainage profond.
 E : Evaporation du sol.
 T : Transpiration.

Le retour de l'eau dans l'atmosphère s'effectue par évaporation du sol (E) et par transpiration des végétaux (T). Pour une période donnée, le bilan hydrologique en forêt peut alors s'écrire (AUSSENAC, 1971)

$$(3) \quad P_i = E + T + I_n + D + F + R + \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad ; \Delta S \text{ représentant la variation du stock d'eau du sol}$$

Dans ce bilan, nous négligeons l'eau fixée par les processus biologiques. SCHNOCK (1970) donne 1.2 mm/an pour une chênaie calcicole en Belgique. Il s'agit donc d'une quantité d'eau qui peut être négligée dans un bilan de ce type.

B. INFLUENCE DU COUVERT SUR LES PRECIPITATIONS

Ainsi que nous le disions précédemment, les pluies qui tombent sur un peuplement sont fortement influencées par le couvert et se divisent en 3 fractions : il est possible d'écrire :

$$(4) \quad P_i = P_s + P_t + I_n \text{ qui constitue l'équation de base pour l'étude de ces phénomènes. En effet, si } P_i, P_s \text{ et } P_t \text{ peuvent être évalués directement, il n'en est pas de même pour } I_n \text{ qui, au moins à l'échelle des peuplements, doit être calculé par différence :}$$

$$(5) \quad I_n = P_i - (P_s + P_t).$$

1 - Méthodes d'étude

a) Mesure des précipitations tombant sur les peuplements (Pi).

Les précipitations qui tombent sur un peuplement peuvent être évaluées à l'aide de pluviomètres installés soit au-dessus du couvert, soit à la surface du sol dans un lieu découvert situé à proximité de la parcelle étudiée.

La mesure correcte de la pluviosité est difficile car un pluviomètre, quelque soit son type, crée une perturbation aérodynamique qui modifie le champ des précipitations en créant des tourbillons qui affectent son coefficient de captation et par voie de conséquence la hauteur d'eau captée. L'augmentation de la vitesse du vent entraîne une erreur par défaut que certains auteurs évaluent à 10, 15 % (PONCELET, 1959, 1962). Aussi, quelques chercheurs (REYNOLDS, 1963), ont utilisé des pluviomètres munis de déflecteurs pour améliorer la représentativité des mesures.

Dans le cas de nos peuplements de Picea abies, Pinus sylvestris, Abies grandis et feuillus mélangés (Forêt d'Amance) (voir tableau n° 1), les précipitations incidentes (Pi) ont été évaluées à l'aide de deux pluviomètres "association" (1) installés au sommet d'une tour dans la partie supérieure des couronnes. Une comparaison avec un pluviomètre installé à 1,50 m au-dessus du sol à proximité en plein découvert (2), n'a pas montré de différence significative. Certains auteurs (REMENIERAS, 1965) estiment d'ailleurs que les précipitations recueillies dans un pluviomètre installé à 1,50 m de hauteur sont inférieure de 1 % aux précipitations recueillies par un pluviomètre posé à la surface du sol.

(1) Ce type de pluviomètre a été mis au point en 1867 par l'Association Scientifique de France d'où le nom qui a été retenu aujourd'hui. La surface réceptive est de 400 cm² avec un diamètre de 22,6 cm.

(2) Il s'agit du poste climatologique de CHAMPENOUX que nous avons installé nous-même en 1966.

Pour les autres peuplements (*voir tableau n° 1*), nous avons utilisé des pluviomètres installés à 1,50 m de hauteur dans des zones de plein découvert. Il est quand même probable que nous avons évalué les précipitations incidentes par défaut bien que l'on puisse estimer cette erreur faible (1 à 2 %). En Belgique, SCHNOCK (1970) arrive à des conclusions identiques.

Deux modèles de pluviomètres "association" ont été utilisés :

- le premier correspond au type même de l'appareil : seau en zinc, entonnoir et bague réceptrice du même métal. La mesure de la hauteur d'eau recueillie se faisant à l'aide d'une éprouvette graduée,
- le deuxième correspond au type créé par la SPEIA (3). Il est en matière plastique et la mesure des hauteurs d'eau se fait par lecture directe.

La comparaison des hauteurs d'eau recueillies en un même endroit : en l'occurrence le poste climatologique du CNRF à CHAMPENOUX, nous a montré que les deux types de pluviomètres ne donnaient pas la même évaluation (*figure n° 12*). Le pluviomètre SPEIA capte davantage que le pluviomètre "association", le biais est de l'ordre de 0,5 mm. Ce résultat est supérieur au chiffre (4 %) donné par VITON (1970) pour le modèle SPEIA modifié par la Météorologie Nationale. Dans le cas où cela était nécessaire (comparaison de pluviométries mesurées avec les deux types de pluviomètres) nous avons corrigé les données du pluviomètre SPEIA pour les rendre comparables à celles du pluviomètre en zinc.

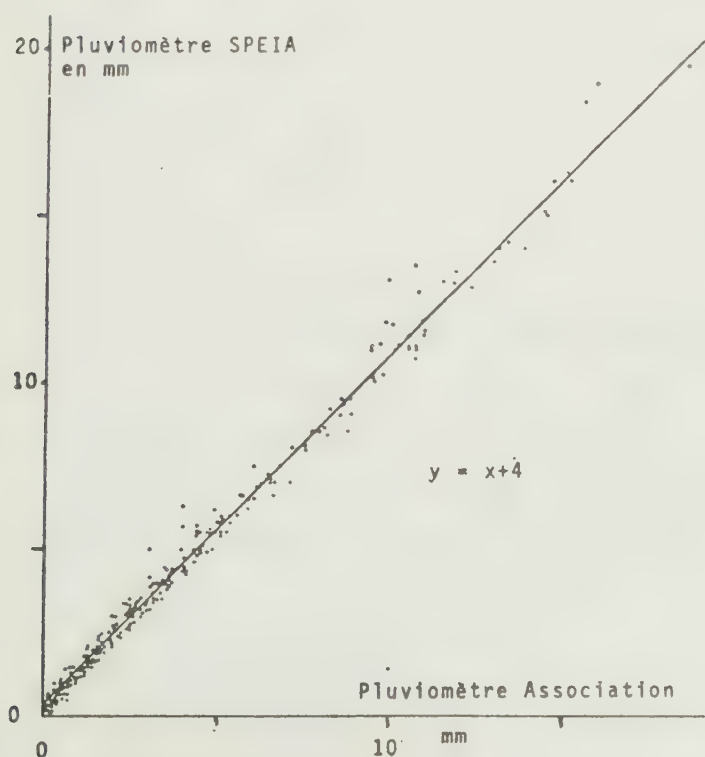


FIGURE 12
COMPARAISON DU PLUVIOMETRE
"ASSOCIATION"
ET DU PLUVIOMETRE SPEIA.
(Avril 1969 - Juin 1971).

(3) SPEIA : Syndicat
Professionnel Engrais
de l'Industrie Azotée

b) Mesure des précipitations arrivant directement au sol (Ps)

Pour évaluer les précipitations arrivant directement au sol (Ps), nous avons utilisé également des pluviomètres association (*Photographie n° 2 et 3 Annexe*).

Le couvert forestier présente une grande hétérogénéité et une évaluation de la pluviométrie au sol est difficile.

Aussi, dans un premier temps (AUSSENAC, 1968, 1970), nous avons procédé de façon analytique et utilisé deux modalités de mesure :

- d'une part, une série de pluviomètres ont été installés à poste fixe après que leur emplacement eut été choisi au hasard (méthode de hazard)
- d'autre part, une deuxième série était constituée par des pluviomètres "mobiles". Au cours de l'expérience, chacun de ces pluviomètres a été déplacé sur une série de 12 points choisis au hasard sur une grille (à maille de 75 cm de côté) couvrant le plateau d'expérimentation. Le déplacement d'un point à un autre s'effectuant chaque fois que 30 mm étaient tombés sur les peuplements (le changement était effectué simultanément dans les peuplements étudiés).

Dans un deuxième temps, pour les peuplements de Fagus silvatica de Pseudotsuga menziesii et Quercus sessiliflora (*tableau n° 1*), nous n'avons utilisé que des pluviomètres fixes.

Les précipitations arrivant au sol dans les peuplements sont évalués pour chaque pluie en effectuant la moyenne des hauteurs d'eau recueillies dans chacun des pluviomètres :

$$(6) \quad \bar{P}_s = \frac{\sum_{i=1}^n P_{s_i}}{n}$$

c) Mesure de l'écoulement le long des troncs (Pt)

L'eau qui s'écoule le long des troncs peut représenter une fraction non négligeable de l'eau retournant au sol et peut constituer une modification importante du bilan hydrique autour des arbres. Pour l'évaluer, nous avons été amenés à concevoir un système original de collier en matière plastique

(Photographie n° 4 - Annexe) (AUSSENAC, 1968). Il s'agit d'un dispositif entourant entièrement le tronc à une hauteur de 80 cm. L'étanchéité est assurée par un glaci⁽¹⁾s de mastic. La fixation est réalisée par un dispositif constitué par une tige filletée qui permet de desserrer le collier au fur et à mesure de la croissance de l'arbre.

Les arbres de chaque placeau ont été ventilés dans les différentes classes de diamètre (2), ce qui a permis d'installer les colliers en fonction de cette distribution. Dans chaque classe, la désignation des arbres échantillons a été faite au hasard.

L'eau recueillie par les colliers est stockée dans des bidons installés au pied des troncs. Le volume total d'eau arrivant au sol est calculé en multipliant le volume d'eau recueilli sur les arbres échantillons (n) par le rapport du nombre total (N) d'arbres dans le placeau au nombre d'arbres étudiés (n). Ce volume est ensuite transformé en hauteur d'eau en le divisant par la différence de la surface totale du placeau (Sp) et de la surface derrière des arbres (St) soit la formule :

$$(7) \quad P_t = \frac{\sum_{i=1}^n P_t \times N}{n (S_p - S_t)}$$

Ainsi, après avoir mesuré Pi, Ps, Pt, il est possible de calculer l'interception nette (In) selon la formule (5).

2 - Cas des couverts fermés

Nous nous intéressons tout d'abord au cas des couverts fermés, c'est-à-dire à cimes jointives, ne laissant subsister que très peu d'espace entre les couronnes. Les peuplements peuvent avoir des cimes jointives quelque soit leur âge. Nous aborderons ensuite les peuplements ouverts à couvert plus ou moins clairié.

(1) Kalma, Stanhil (1968) ont proposé un système assez voisin du nôtre.

(2) mesuré à 1,30 m.

a) Précipitation arrivant directement au sol (P_s)

1° - Etude générale du phénomène

Les précipitations qui arrivent au sol sont fortement influencées par la nature et la structure du couvert. Les facteurs climatiques interviennent également et finalement, cette redistribution au sol des précipitations est très variable. Il s'agit là d'un aspect non négligeable de l'influence de la forêt sur le cycle de l'eau. Cette variation entraîne des différences de profil et de bilans hydriques d'un point à un autre qui ont une grande importance pour l'écologie des peuplements forestiers (AUSSENAC, 1970).

Nous allons étudier successivement le rôle des facteurs climatiques et de la structure du couvert sur les précipitations arrivant directement au sol.

- Variation des précipitations au sol en fonction des facteurs du climat dans le courant de l'année.

La redistribution au sol des précipitations est conditionnée par plusieurs facteurs qui interviennent au niveau des précipitations incidentes comme à celui des peuplements considérés. A partir des quatre peuplements (Abies grandis, Picea abies, Pinus sylvestris, feuillu), nous avons essayé d'expliquer les précipitations au sol en fonction des variables suivantes :

- Caractéristiques climatiques

- les précipitations incidentes (P_i) journalières, en mm,
- l'intensité des précipitations incidentes (i) en mm/heures
- la vitesse moyenne du vent pendant les précipitations (v)
- la température moyenne de la journée considérée (θ_m)
- le pouvoir évaporant de l'air (E) mesuré à l'évaporomètre Piche pour la journée considérée.

- Caractéristiques du peuplement

- La variation de biomasse (B) évaluée par la chute des litières (feuilles, branches). En effet, après la période de feuillaison, les arbres vont présenter toute l'année jusqu'au débourrement suivant, une diminution

continue de leur biomasse qui peut se traduire par une variation du pouvoir d'interception. Les chutes de litière ont été évaluées semaine par semaine (AUSSENAC, 1969). Pour l'ensemble de l'année, elles correspondent environ à 6 t/ha (Poids sec) pour Pinus sylvestris, 2,5 t/ha pour Picea abies, 3 t/ha pour Abies grandis et à 3,5 t/ha pour le peuplement feuillu (voir tableau n° 6).

TABLEAU N° 6

RETOUR DE MATIÈRE ORGANIQUE DANS LES DIFFÉRENTS PEUPLEMENTS
ÉTUDIÉS (EN TONNE/HA)

ESPECE, PERIODE	ABIES GRANDIS	PICEA ABIES	PINUS SILVESTRIS	FEUILLUS
18 mai 1965 au 4 septembre 1965	0,356 $\pm$ 0,064	0,626 $\pm$ 0,198	1,124 $\pm$ 0,147 *	
5 septembre 1965 au 4 septembre 1966	3,035 $\pm$ 0,499	2,078 $\pm$ 0,461	6,182 $\pm$ 1,099	
5 septembre 1966 au 4 septembre 1967	2,954 $\pm$ 0,542	3,769 $\pm$ 1,014	5,800 $\pm$ 1,000	3,714 $\pm$ 0,214

* Intervalle de confiance à P = 0,95

Les calculs de régression progressive ont permis de mettre en évidence les facteurs qui interviennent de façon significative dans l'explication des précipitations au sol.

Les précipitations incidentes (P_i) interviennent en premier lieu, ceci n'a rien d'étonnant bien sûr quand on voit la relation étroite qui lie P_s et P_i (*figure n° 13*).

En dehors de P_i , le vent apparaît comme le facteur le plus important. Bien que dans la matrice des coefficients de corrélation, la liaison soit positive, dans l'expression de la régression multiple, il apparaît que plus le vent est fort, moins P_s est important. Ceci peut s'expliquer de deux manières :

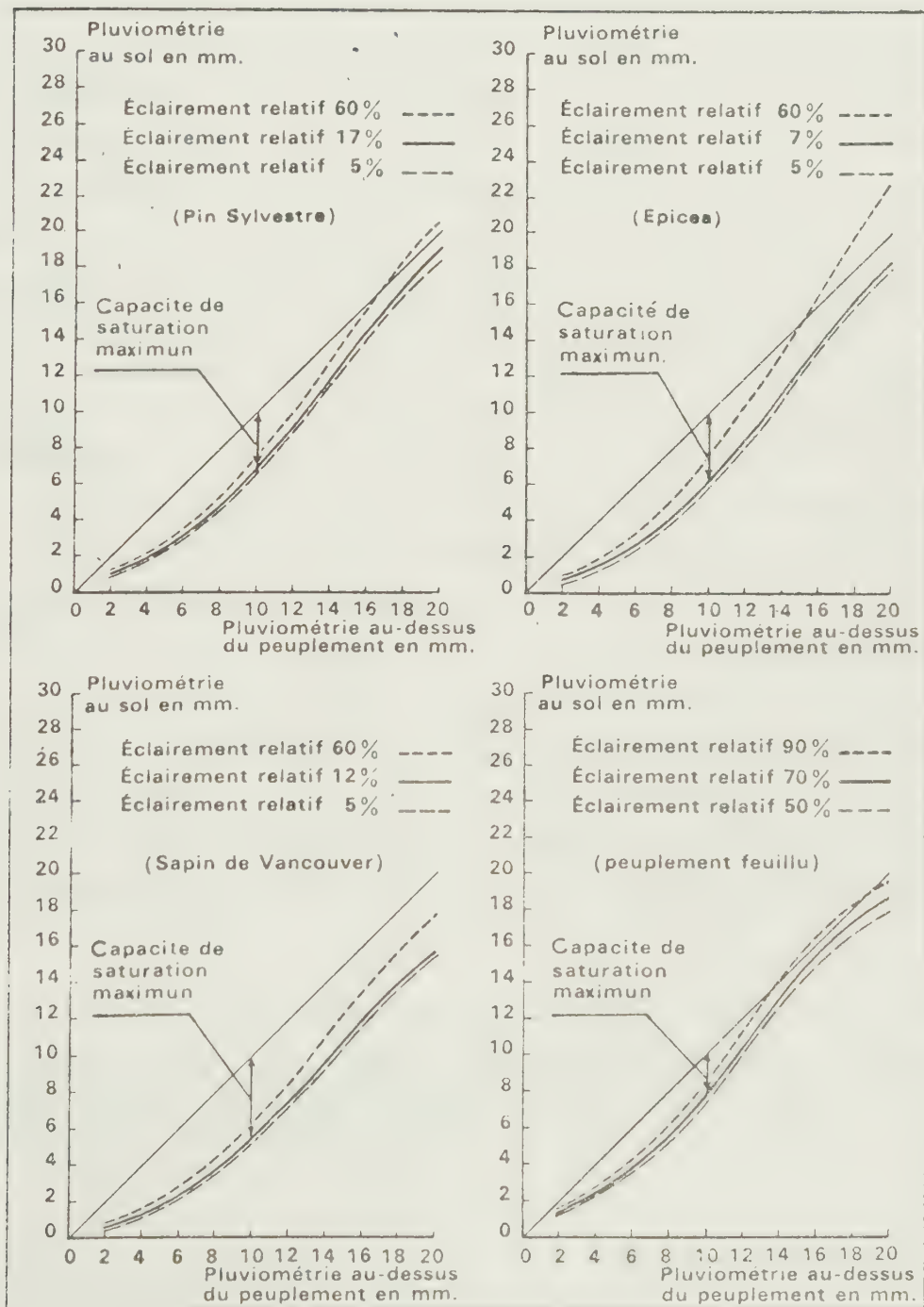
- une liaison non linéaire entre P_i et le vent
- ou le fait que lorsque la force du vent augmente, la trajectoire des gouttes est modifiée et l'écoulement (P_t) augmente, P_s diminuant alors.

Après le vent, l'intensité des précipitations incidentes joue un rôle non négligeable : plus elle est élevée, plus P_s est important.

La variation de biomasse (B) n'intervient de façon significative que dans le cas de Picea abies.

FIGURE 13

PRECIPITATIONS SOUS COUVERT (P_s) EN FONCTION DES
PLUIES INCIDENTES (P_i).



- Variation des précipitations au sol en fonction de la surface foliaire et de la morphologie des rameaux

L'importance de la pluie au sol dépend de la surface foliaire et de la morphologie des rameaux. Pour tourner cette difficulté, nous avons utilisé une méthode originale (AUSSENAC 1968) reposant sur la mesure de l'éclairement relatif. Les mesures ont été réalisées au-dessus de chaque emplacement de pluviomètre à l'aide d'une cellule photoélectrique. L'éclairement relatif dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de l'épaisseur de la couronne, de la disposition des feuilles et de la densité de la voûte foliacée. L'échantillonnage a porté sur la portion de couronne se trouvant directement au-dessus des surfaces réceptrices des pluviomètres. Dans ce but, nous avons été conduit à réaliser un appareillage particulier constitué par une cellule photorésistance au Sulfure de Cadmium (Métrastar) placée à l'extrémité d'un tube de 100 cm de long et de 5 cm de diamètre (1). De cette manière, l'angle de mesure est extrêmement réduit ($2^{\circ} 50'$). Lorsque l'éclairement augmente en plein découvert, l'éclairement relatif (%) diminue dans le peuplement. Cependant NAEGELI (1940) et ROUSSEL (1953) ont montré que par temps couvert bien égal, sans vent et sans nuages élevés, la valeur de l'éclairement relatif reste constante quelque soit l'éclairement extérieur. C'est le type de temps qui a été retenu pour effectuer nos mesures.

De cette façon, on a pu effectuer un échantillonnage satisfaisant de l'éclairement relatif dans les peuplements. Il a porté sur 78 points dans les Pins sylvestres et le peuplement feuillu, 52 points chez Picea abies et Abies grandis. A la suite de cet échantillonnage, nous avons entrepris une étude statistique pour lier les précipitations au sol (Ps) en un point déterminé, aux précipitations incidentes (Pi) et à l'éclairement relatif (E).

(1) En fait, en raison de cet angle d'ouverture très faible, le terme d'éclairement n'est pas absolument exact et ne doit pas être pris dans le sens de l'éclairement au point de mesure.

Les calculs de régression progressive ont été effectués par Cl. MILLIER de la Station de Biométrie du C.N.R.F.

Les équations obtenues sont de la forme :

$$(8) \quad \text{LN} (P_s + 1) = b_0 + b_1 E + b_2 P_i + b_3 P_i^2 \quad (1)$$

Ces résultats sont rapportés dans le tableau n° 7. Afin d'étudier la relation plus en détail, les calculs ont été effectués pour des périodes de 3 mois.

TABLEAU N° 7

RESULTATS DE L'ANALYSE DE REGRESSION PROGRESSIVE POUR L'ETUDE DES PRECIPITATIONS AU SOL (P_s)

PINUS SILVESTRIIS					PICEA ABIES				
PERIODE	MAI JUILLET 1965	AOUT OCTOBRE 1965	NOVEMBRE 1965 JANVIER 1966	FEVRIER AVRIL 1966	PERIODE	MAI JUILLET 1965	AOUT OCTOBRE 1965	NOVEMBRE 1965 JANVIER 1966	FEVRIER 1966 AVRIL 1966
b 0	- 0,1723	- 0,0165	0,1990	0,0085	b 0	- 0,2623	- 0,1069	- 0,0220	- 0,1057
b 1	0,0087* *	0,0069* *	0,0020* *	0,0049* *	b 1	0,0172*	0,0031*	0,0041*	0,0074* *
b 2	0,2999* *	0,2673* *	0,2281* *	0,2383* *	b 2	0,2694* *	0,2791* *	0,2398* *	0,2412* *
b 3	- 0,0088* *	- 0,0065* *	- 0,0045* *	- 0,0054* *	b 3	- 0,0065* *	- 0,0068* *	- 0,0046* *	- 0,0045* *
s	0,272	0,176	0,248	0,260	s	0,392	0,326	0,320	0,358
R 2	0,930	0,970	0,966	0,942	R 2	0,888	0,928	0,946	0,915
ABIES GRANDIS					PEUPLETIER FEUILLE				
PERIODE	MAI JUILLET 1965	AOUT OCTOBRE 1965	NOVEMBRE 1965 JANVIER 1966	FEVRIER AVRIL 1966	PERIODE	JUILLET SEPTEMBRE 1966	OCTOBRE DECEMBRE 1966	JANVIER MARS 1967	AVRIL JUN 1967
b 0	0,1002	- 0,1126	0,0370	- 0,0895	b 0	0,1437	0,2487	0,2772	0,0743
b 1	0,0055* *	0,0024* *	0,0025* *	0,0026* *	b 1	0,0006 N.S.	0,0027* *	0,0020* *	0,0027* *
b 2	0,2055* *	0,2617* *	0,2235* *	0,2108* *	b 2	0,2549* *	0,1958* *	0,2347* *	0,2305* *
b 3	- 0,0036* *	- 0,0062* *	- 0,0043* *	- 0,0040* *	b 3	- 0,0050*	- 0,0027* *	- 0,0055* *	- 0,0040* *
s	0,368	0,287	0,312	0,332	s	0,200	0,200	0,227	0,253
R 2	0,872	0,938	0,942	0,923	R 2	0,959	0,976	0,960	0,955

* Valeur significative au seuil de probabilité de 5% - ** Valeur significative au seuil de probabilité de 1% -
N.S. Valeur non significative au seuil de probabilité de 5%

(1) $\text{LN} (P_s + 1) = \text{logarithme népérien de } P_s + 1$

On constate que pour chaque peuplement les relations sont très voisines d'une période à l'autre. Il s'agit donc d'une caractéristique de chaque parcelle. Pour l'année, les équations (AUSSENAC 1968) sont les suivantes :

(9) - Pinus sylvestris

$$\begin{aligned} \text{LN (Ps + 1)} &= 0,0047 + 0,0056 \text{ E} - 0,0063 \text{ Pi}^2 \\ R^2 &= 0,954 \qquad S = 0,239 \end{aligned}$$

(10) - Picea abies

$$\begin{aligned} \text{LN (Ps + 1)} &= - 0,1242 + 0,00795 \text{ E} + 0,2573 \text{ Pi} - 0,0058 \text{ Pi}^2 \\ R^2 &= 0,919 \qquad S = 0,324 \end{aligned}$$

(11) - Abies grandis

$$\begin{aligned} \text{LN (Ps + 1)} &= 0,0162 + 0,00325 \text{ E} + 0,2254 \text{ Pi} - 0,0045 \text{ Pi}^2 \\ R^2 &= 0,919 \qquad S = 0,349 \end{aligned}$$

avec :

E : éclaircissement relatif
 R^2 : coefficient de corrélation multiple
 S : l'écart type résiduel.

La figure n° 13 montre les courbes obtenues pour 3 valeurs de l'éclaircissement relatif. Les précipitations au sol (Ps) augmentent avec l'éclaircissement relatif (E). Pour des valeurs très élevées de ce dernier, elles peuvent être très supérieures à la pluie incidente (Pi). Ceci est dû aux phénomènes de "gouttière" qui sont d'ailleurs très importants chez les Epiceas en raison de la morphologie particulière de cette espèce (rameaux retombants).

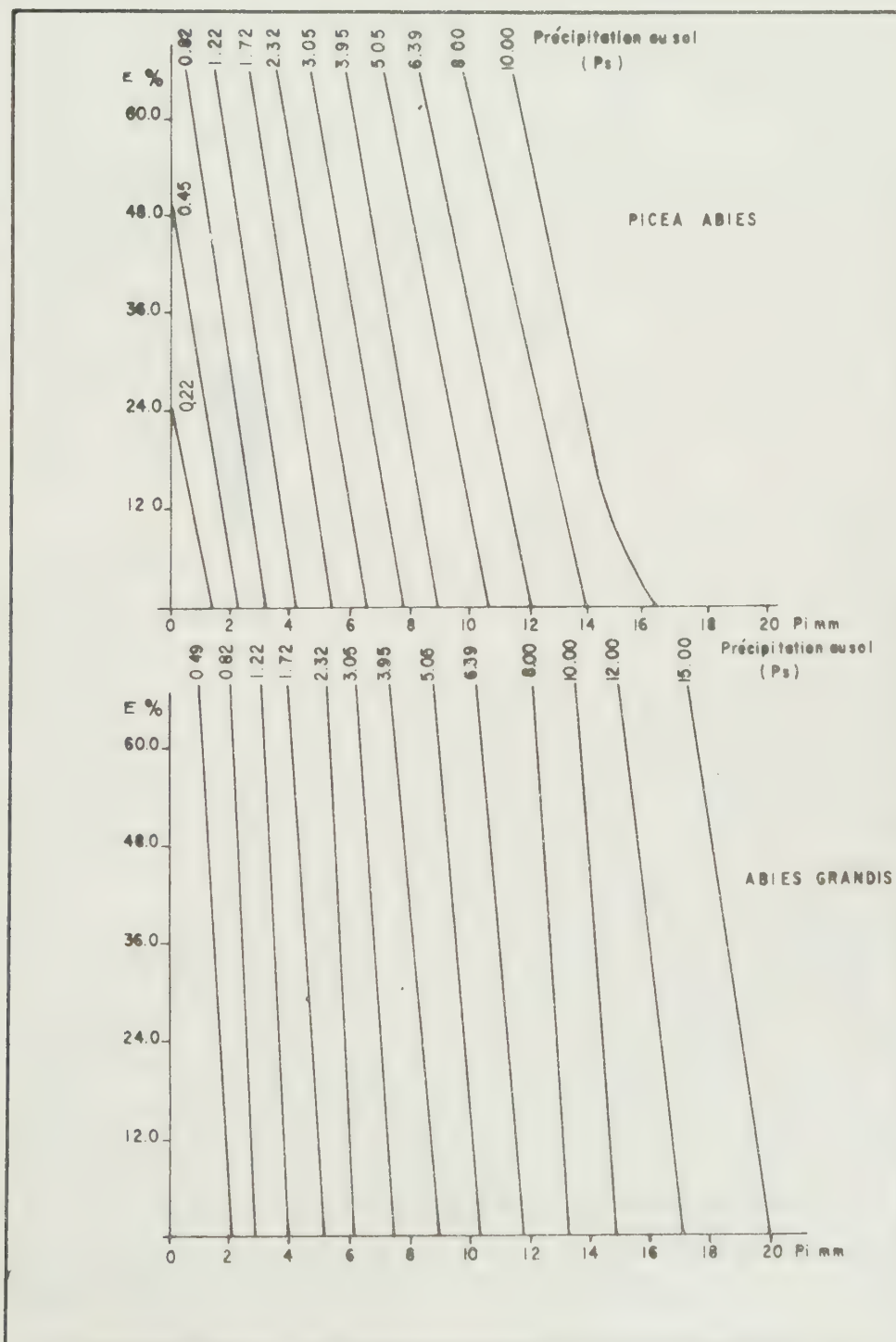
- Variation des précipitations (Ps) avec l'importance du couvert et la position par rapport au tronc.

Nous avons vu que d'un point à l'autre sous le couvert, les précipitations (Ps) étaient liées à l'éclaircissement relatif.

La figure n° 14 donne les variations des précipitations au sol en fonction de l'éclaircissement relatif (E) et des précipitations incidentes.

FIGURE 14

GRAPHIQUES DONNANT À PRÉCIPITATION AU SOL (P_s)
CONSTANTE, L'ÉCLAIREMENT RELATIF (E) ET LA
PRÉCIPITATION INCIDENTE (P_i).



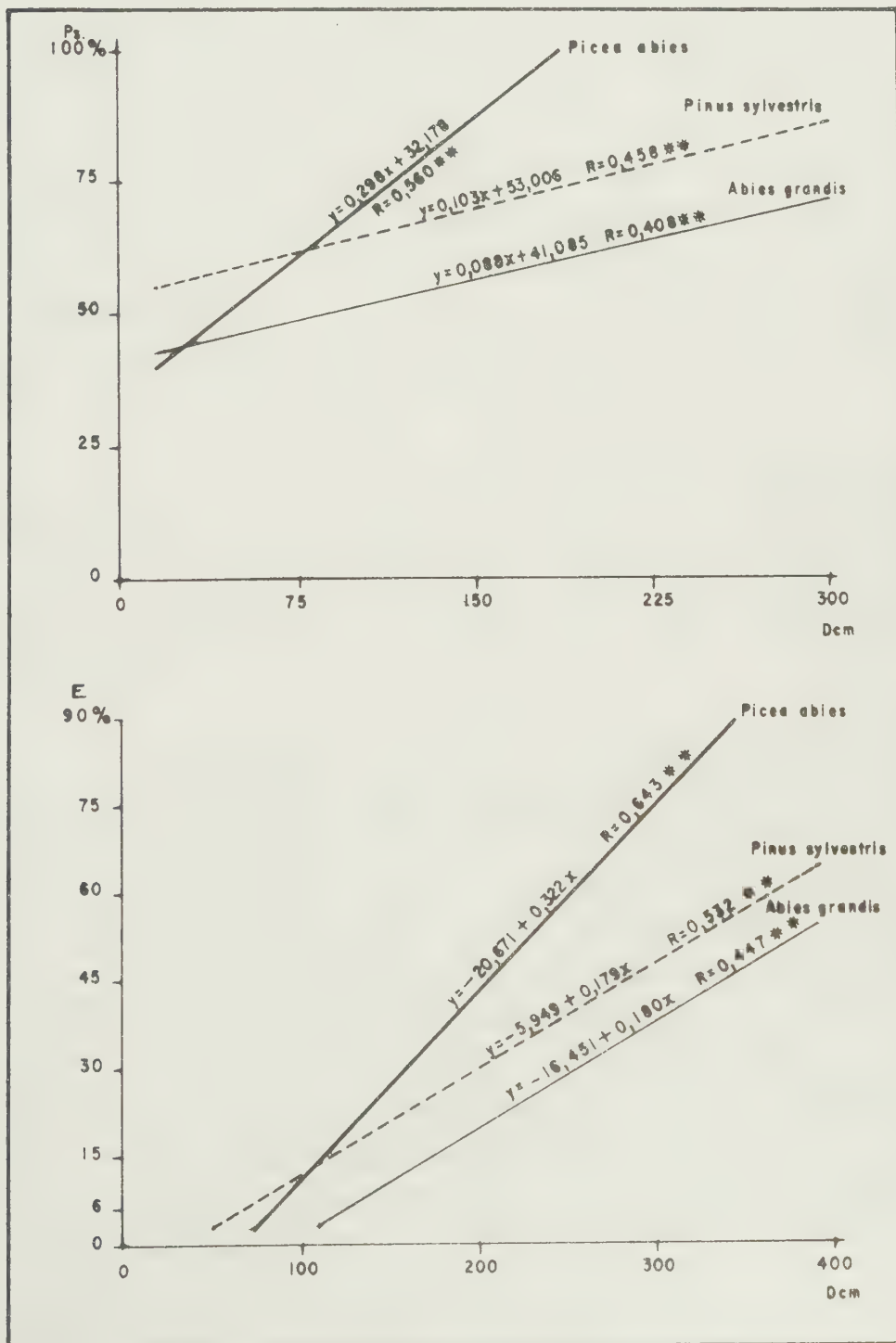
Les précipitations au sol sont représentées par une famille de courbes, dont la pente diminue des faibles précipitations aux fortes. Pour une même précipitation incidente (P_i), la même variation ΔE entraîne une plus grande variation de P_s , (ceci est dû à la pente des courbes considérées). Si à la limite, ces dernières devenaient des droites perpendiculaires à l'axe des abscisses, l'éclairement relatif n'interviendrait plus. C'est-à-dire que l'hétérogénéité du couvert forestier ne pourrait pas être mise en évidence et que seul un effet d'interception d'ensemble apparaîtrait. C'est d'ailleurs ce que tendrait à montrer la figure n° 14 pour Abies grandis. Il est possible de voir en effet que la variation d'éclairement relatif est plus déterminante pour les Epicéas que pour les Sapins de Vancouver. Ceci peut-être expliqué en remarquant (*tableau n° 1*) que ces derniers sont plus grands que les Epicéas et qu'il est possible que le vent homogénéise les précipitations sous le couvert. On voit donc ici que l'utilisation de l'éclairement relatif comme paramètre explicatif de la pluie au sol (P_s) peut être limité par l'effet du vent.

La structure et l'épaisseur du couvert varient beaucoup quand on s'éloigne du tronc. Afin de voir dans quelle mesure cela se répercutait sur les précipitations au sol, nous avons étudié la relation qui liait la distance au tronc à P_s (évalué en % de P_i), en utilisant des régressions linéaires qui se sont avérées significatives au seuil de $P \leq 0,05$. L'introduction comme variable explicative de la dimension du tronc (circonférence) ne s'est pas avérée significative et elle n'a pas été retenue. La figure n° 15 donne ces droites, leur équation et le coefficient de corrélation.

Les précipitations au sol augmentent quand on s'éloigne du tronc et quand on s'approche des couronnes. Cette augmentation est due à l'éclairement relatif qui augmente également du tronc vers la périphérie des couronnes (*voir figure n° 15*). Ceci nous montre que la variation de P_s est bien le fait du feuillage et non d'un effet de toit. Certains auteurs pensent pourtant que les précipitations au sol ne varient pas avec la distance au tronc. Il est possible que leur échantillonnage n'ait pas été suffisant, d'autant plus que la relation que nous avons pu mettre en évidence est plus ou moins étroite selon l'importance des précipitations incidentes. KITTREDGE (1948) avait fait des observations identiques.

FIGURE 15

- a/ VARIATION DES PRECIPITATIONS AU SOL (% de Pi) EN
FONCTION DE LA DISTANCE AU TRONC LE PLUS PROCHE
DANS TROIS PEUPELEMENTS RESINEUX.
- b/ VARIATION DE L'ECLAIREMENT RELATIF (E) EN
FONCTION DE LA DISTANCE AU TRONC LE PLUS PROCHE.



2° - Influence de l'essence : cas des feuillus et des résineux

Les précipitations arrivant directement au sol ont été évaluées dans plusieurs peuplements (*voir tableau n° 1*). Le tableau n° 8 donne pour les différentes périodes d'étude, Ps en valeur absolue et valeur relative (% de Pi). On remarquera que d'une façon générale, les fractions les plus faibles (en % de Pi) ont été observées dans le peuplement d'Abies grandis. A ce niveau d'étude, il n'est pas possible de différencier feuillus et résineux car, comme nous le verrons par la suite, d'autres phénomènes interviennent, par exemple l'écoulement le long des troncs. Dans le cas des feuillus, il est cependant intéressant de remarquer que le peuplement de Quercus sessiliflora (parcelle IV, Forêt de Bellême) a un pourcentage de précipitations au sol plus élevé que des peuplements de Fagus silvatica (parcelles I et II, Forêt de Haye) que l'on peut qualifier d'homologues (par leurs dimensions et leur structure). Ce résultat est en liaison avec le couvert moins épais du chêne.

Par contre, il est possible d'aborder le problème au niveau de la variabilité des précipitations au sol (AUSSENAC, 1970). En effet, ainsi que nous l'avons vu au chapitre précédent, la morphologie et la ramification du feuillage, l'importance de la biomasse agissent directement sur la redistribution de l'eau au sol.

Le tableau n° 9 donne pour 4 peuplements étudiés en Forêt d'Amance (Abies grandis, Picea abies, Pinus sylvestris, feuillu), les précipitations au sol (Ps) et le coefficient de variation (V %) correspondant. Il est facile de constater que le peuplement d'Epicea présente d'une façon générale le coefficient de variation le plus élevé. Ensuite, viennent le Sapin de Vancouver, le Pin Sylvestre et le peuplement feuillu. Ce résultat tient à la structure des peuplements et aux caractéristiques des espèces. La répartition des précipitations (Ps) est donc la moins uniforme dans le plateau d'Epicea. Ce qui revient à dire que dans ce peuplement, on doit s'attendre, d'un emplacement considéré à un autre, à une variabilité plus grande que dans les autres peuplements considérés. En ce qui concerne les feuillus, cette variabilité augmente au moment de la chute des feuilles.

TABLEAU N° 8

TABLEAU GENERAL DE L'ETUDE DE L'INFLUENCE DU COUVERT SUR LES
PRECIPITATIONS DANS LE CAS DES PEUPELEMENTS FERMES ET ECLAIRCIS

ESPECE	PERIODE	SITUATION	PLUIE INCIDENTE	PLUIE AU SOL		ECOULEMENT LE LONG DES TRONCS		INTERCEPTION	
			(P _i)	(P _s)		(P _t)		(I _n)	
			mm	mm	%	mm	%	mm	%
Abies grandis (sapin de Vancouver)	Mai 1965	Forêt d'Amance	882,4	492,1	55,8	9,5	1,1	380,7	43,1
	Avril 1966								
	Mai 1966	Forêt d'Amance	750,5	433,6	57,8	7,1	1,0	309,8	41,2
	Avril 1967								
Picea abies (Epicéa)	Mai 1965	Forêt d'Amance	882,4	561,15	63,6	16,9	1,9	304,0	34,5
	Avril 1966								
	Mai 1966	Forêt d'Amance	750,5	479,9	63,9	13,4	1,8	257,2	34,3
	Avril 1967								
Pinus sylvestris (Pin sylves- tre)	Mai 1965	Forêt d'Amance	882,4	592,7	67,2	15,0	1,7	274,7	31,1
	Avril 1966								
	Mai 1966	Forêt d'Amance	750,5	510,2	68,0	11,4	1,5	228,9	30,5
	Avril 1967								
Peuplement feuillu (Hêtre + charme)	Juillet 1966	Forêt d'Amance	356,0	266,3	74,8	22,5	6,3	67,2	18,9
	Hiver 1966-67	Forêt d'Amance	368,2	284,1	77,2	28,5	7,7	55,5	15,1
	Année	Forêt d'Amance	724,2	550,4	76,0	51,0	7,1	122,7	16,9
	Hiver 1971	Forêt de Haye	163,6	95,2	58,2	26,6	16,3	41,7	25,5
Fagus silvatica I (Hêtre)	Eté 1972	Forêt de Haye	537,7	304,2	56,5	78,6	14,6	154,9	28,9
	Année	Forêt de Haye	701,3	399,4	56,9	105,3	15,0	196,5	28,0
	Hiver 1971	Forêt de Haye	183,6	112,1	61,0	23,7	12,9	47,9	26,1
	Eté 1972	Forêt de Haye	525,7	333,7	63,4	58,6	11,2	133,8	25,4
Fagus silvatica II	Année	Forêt de Haye	709,3	445,8	62,8	82,3	11,6	181,7	25,5
	Hiver 1971	Forêt de Haye	153,1	105,5	68,9	17,8	11,6	29,8	19,4
	Eté 1972	Forêt de Haye	582,8	387,2	66,4	50,1	8,6	145,7	25,0
	Année	Forêt de Haye	735,9	492,8	66,9	67,9	9,2	175,5	23,8
Fagus silvatica III	Hiver 1971	Forêt de Haye	92,0	59,0	64,1	12,0	13,1	21,0	22,8
	Eté 1972	Forêt de Haye	524,0	333,6	63,6	56,8	10,9	133,5	25,5
	Année	Forêt de Haye	616,0	392,6	63,7	68,9	11,2	154,5	25,0
	Eté 1972	Forêt de Bellême	536,0	443,1	82,6	0,7	0,1	92,2	17,2
Quercus sessili- flora I (Chêne sessile)	Hiver 1972	Forêt de Bellême	199,9	155,9	77,9	0,1	0,6	42,9	21,5
	Année	Forêt de Bellême	735,9	599,0	81,4	1,8	0,3	134,2	18,4
	Eté 1972	Forêt de Bellême	536,0	433,2	80,8	0,9	0,2	101,9	19,0
	Hiver 1972	Forêt de Bellême	199,9	150,4	75,2	1,2	0,6	48,3	24,1
Quercus sessili- flora II	Année	Forêt de Bellême	735,9	583,6	79,3	2,1	0,3	150,2	20,4
	Eté 1972	Forêt de Bellême	536,0	413,5	77,1	0,2	0,3	121,0	22,6
	Hiver 1972	Forêt de Bellême	204,3	147,9	72,3	0,2	0,8	54,8	26,8
	Année	Forêt de Bellême	740,3	561,4	75,8	3,1	0,4	175,8	23,8
Quercus sessili- flora III	Eté 1972	Forêt de Bellême	536,0	404,3	75,4	4,2	0,8	127,5	23,8
	Hiver 1972	Forêt de Bellême	204,3	141,7	69,3	5,6	2,7	57,0	27,9
	Année	Forêt de Bellême	740,3	546,0	73,7	9,8	1,3	184,5	24,9
	Eté 1972	Forêt de Bellême	536,0	404,3	75,4	4,2	0,8	127,5	23,8
Quercus sessili- flora IV	Hiver 1972	Forêt de Bellême	204,3	141,7	69,3	5,6	2,7	57,0	27,9
	Année	Forêt de Bellême	740,3	546,0	73,7	9,8	1,3	184,5	24,9
	Eté 1972	Forêt de Bellême	536,0	404,3	75,4	4,2	0,8	127,5	23,8
	Hiver 1972	Forêt de Bellême	204,3	141,7	69,3	5,6	2,7	57,0	27,9
Pseudo- tsuga - menziesii (Douglas)	Hiver+été 72	Forêt d'Amance	460,4	276,4	60,0	35,2	7,7	148,8	32,3
	Hiver+été 72	Forêt d'Amance	460,4	223,7	48,6	69,3	15,0	167,3	36,4
	Hiver+été 72	Forêt d'Amance	460,4	237,0	51,5	55,6	12,1	167,8	36,4
	Hiver+été 72	Forêt d'Amance	460,4	274,3	59,6	28,4	6,2	157,6	34,2

TABLEAU N° 9

ESTIMATION DES PRECIPITATIONS AU SOL (P_s) ET DU COEFFICIENT
DE VARIATION (V) POUR LES QUATRE PEUPLEMENTS ETUDIES POUR
LES PERIODES DE MAI 1965 A AVRIL 1966 ET MAI 1966 A JUIN 1967

[illegible]

La variabilité des précipitations sous le couvert est fonction de leur importance unitaire. L'écart type augment avec l'importance des précipitations, mais si l'on étudie le phénomène en pourcentage, c'est-à-dire en considérant le coefficient de variation (V), on voit que ce dernier varie de façon hyperbolique et qu'il est maximal pour les faibles précipitations (*figure n° 16*). On remarque que pour des précipitations au sol du même ordre de grandeur, le coefficient de variation est le plus grand chez l'*Epicea* et le plus faible chez les feuillus. Pour ces derniers, la variabilité est considérablement plus faible en hiver qu'en été. On voit apparaître ici, bien sûr, le rôle de feuilles. Dans le cas des résineux, nous n'avons pas trouvé de différences avec les saisons.

3° - Influence de la densité

Pour un âge déterminé, la hauteur d'eau qui atteint le sol est fonction de la densité du peuplement. Nous avons étudié et précisé ces phénomènes dans des peuplements de résineux, à savoir 4 placeaux de *Pseudotsuga menziesii* en Forêt d'Amance (*tableau n° 1*).

Le couvert de ces peuplements est fermé, mais le nombre de tiges varie d'une placette à l'autre (*voir tableau n° 1*).

La figure n° 17 montre comment varie Ps avec la densité. On voit que dans ces peuplements, le couvert n'était absolument pas similaire partout, puisqu'il y a une augmentation importante de Ps, de la densité la plus faible à la densité la plus forte. Il apparaît ainsi que la structure (densité) du peuplement a un effet notable sur Ps, même si apparemment le couvert est partout fermé. La variabilité de Ps est la plus faible dans le peuplement le plus dense.

4° - Influence de l'âge

L'âge des peuplements intervient et conditionne, par les structures des couverts, l'importance des précipitations qui atteignent directement le sol. Pour préciser l'influence de l'âge, nous avons utilisé 5 peuplements feuillus à base de Hêtre : 1 peuplement feuillu en Forêt d'Amance et 4 peuplements

FIGURE 16

DISTRIBUTION DU COEFFICIENT DE VARIATION (V en %) DES PRECIPITATIONS AU SOL (Ps) EN FONCTION DE LEUR IMPORTANCE. Forêt d'Amance.

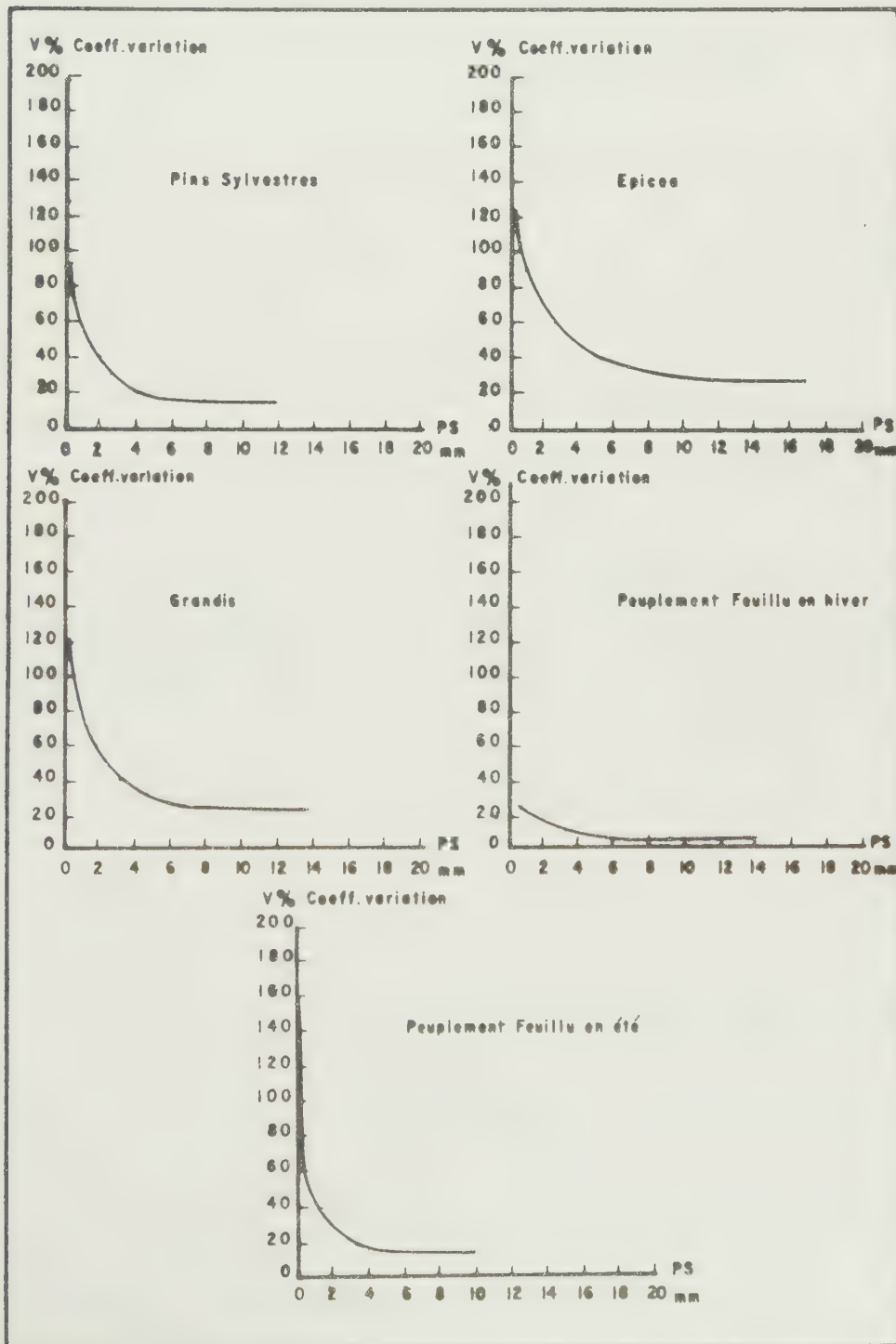


FIGURE 17

INFLUENCE DE LA DENSITE : variation des précipitations au sol (Ps) de l'écoulement le long des troncs (Pt) et de l'interception nette (In) en % avec la densité des peuplements. (*Pseudotsuga menziesii*; Amance).

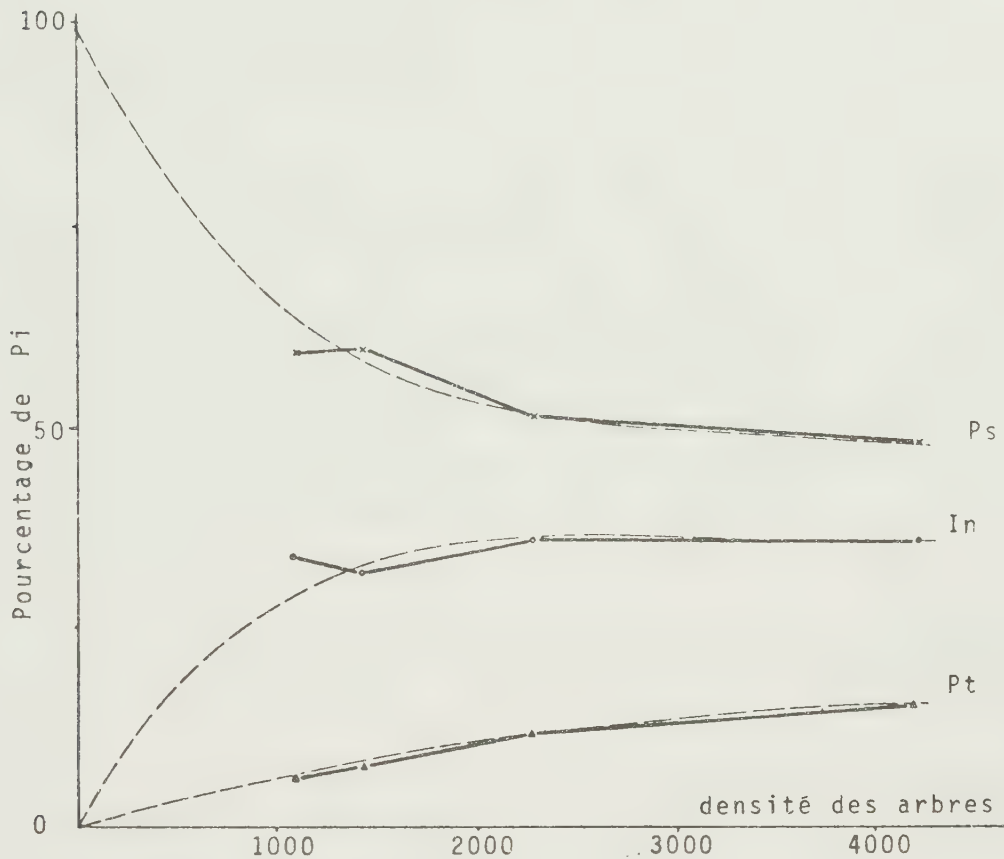
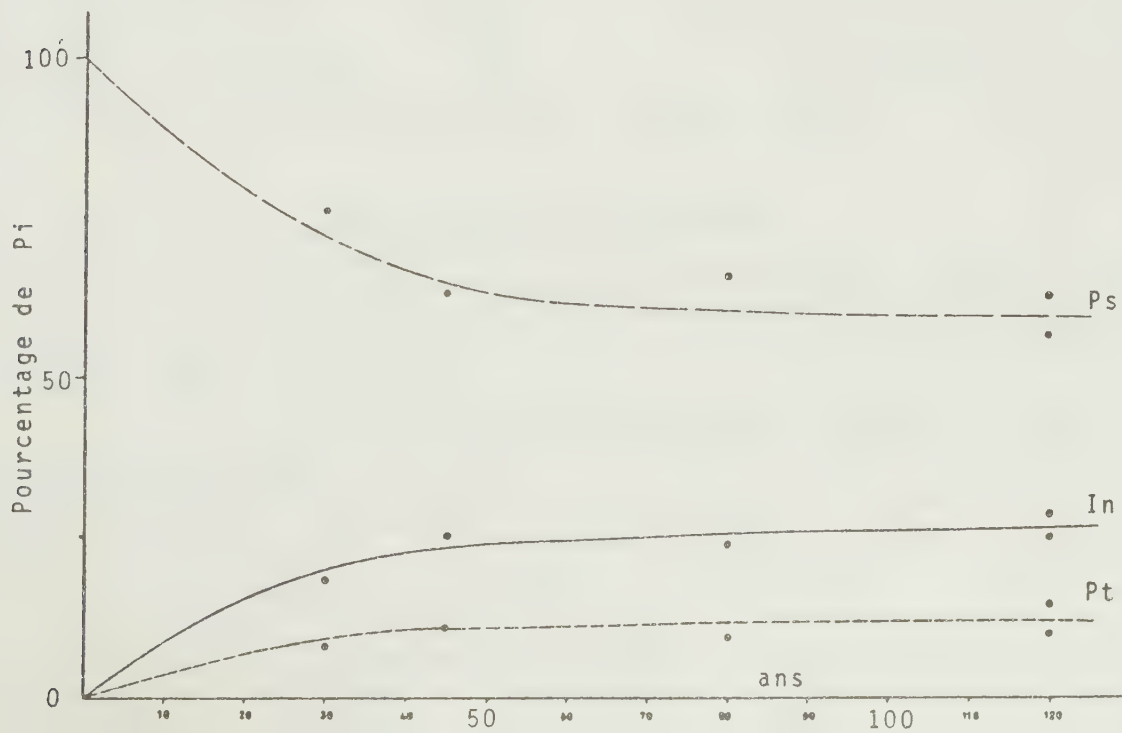


FIGURE 18

INFLUENCE DE L'AGE : variation des précipitations au sol (Ps) de l'écoulement le long des troncs (Pt) et de l'interception nette (In) en % avec l'âge des peuplements. (*Fagus silvatica*; Forêt de Haye et forêt d'Amance).



en Forêt de Haye (voir tableau n° 1). Ces 5 peuplements sont tous à base de Hêtre et ils peuvent être de ce fait comparés valablement.

La figure n° 18 montre comment on peut interpréter la variation de Ps avec l'âge des peuplements. Les fluctuations observées autour des courbes ajustées sont dues à l'influence des éclaircies. On peut remarquer que dès 45 ans, le pourcentage d'eau arrivant au sol ne diminue pas beaucoup ; ceci peut s'expliquer en remarquant que, à cet âge-là, le développement de l'appareil foliaire est proche de l'indice foliaire maximal. Il est probable, par ailleurs, que si on laissait le peuplement vieillir au-delà de 150 ans, le pourcentage de Ps augmenterait, ceci correspondant à la disparition des arbres par mortalité naturelle.

Les résultats avancés ici sont sûrement extrapolables aux autres peuplements forestiers du type de la futaie, qu'ils soient feuillus ou résineux.

La variabilité des précipitations arrivant au sol (Ps) augmente avec l'intensité de l'éclaircie. Ce résultat rejoint les résultats obtenus dans les peuplements de Pseudotsuga menziesii.

b) Ecoulement le long des troncs (Pt)

L'écoulement le long des troncs (Pt) est un paramètre important du cycle hydrologique en forêt. Il a été souvent ignoré par plusieurs auteurs qui considéraient qu'il s'agissait d'une fraction négligeable. En réalité, comme nous le verrons dans les résultats de nos travaux, il s'agit d'un paramètre qui peut être très important pour certaines espèces.

1° - Etude générale du phénomène

L'écoulement le long des troncs dépend de plusieurs facteurs :

- de facteurs écologiques : importance et durée des précipitations, vitesse du vent.
- de facteurs caractéristiques du peuplement : espèce, dimensions des arbres, âge.

Dans ce chapitre, à l'aide des résultats obtenus dans nos différents placeaux, nous allons étudier le rôle des facteurs écologiques et de la dimension des arbres.

D'une façon générale, l'écoulement le long des troncs augmente avec l'importance des précipitations incidentes. Ainsi, la figure n° 16 montre la relation liant P_t à P_i dans 4 peuplements étudiés en Forêt d'Amance (AUSSENAC, 1970). On remarque que la relation n'est pas une relation linéaire. Certains auteurs (SCHNOCK, 1970) ont adopté des ajustements linéaires, mais il semble que l'ajustement curvilinéaire rende mieux compte des phénomènes.

L'écoulement le long des troncs est fortement conditionné par les dimensions de l'arbre et tout spécialement par la grosseur du tronc. On sait, en effet, qu'il existe, dans un peuplement, une bonne relation entre l'importance du houppier et la grosseur du tronc. Dans les peuplements précédents, nous avons effectué une analyse de régression multiple.

L'équation qui a été utilisée est de la forme :

$$(12) \quad L N (P_t) = a_0 + a_1 (X)^2 + a_2 L N (P_i) + a_3 L N (P_i)^2$$

avec P_t = écoulement le long des troncs

X = circonférence du tronc

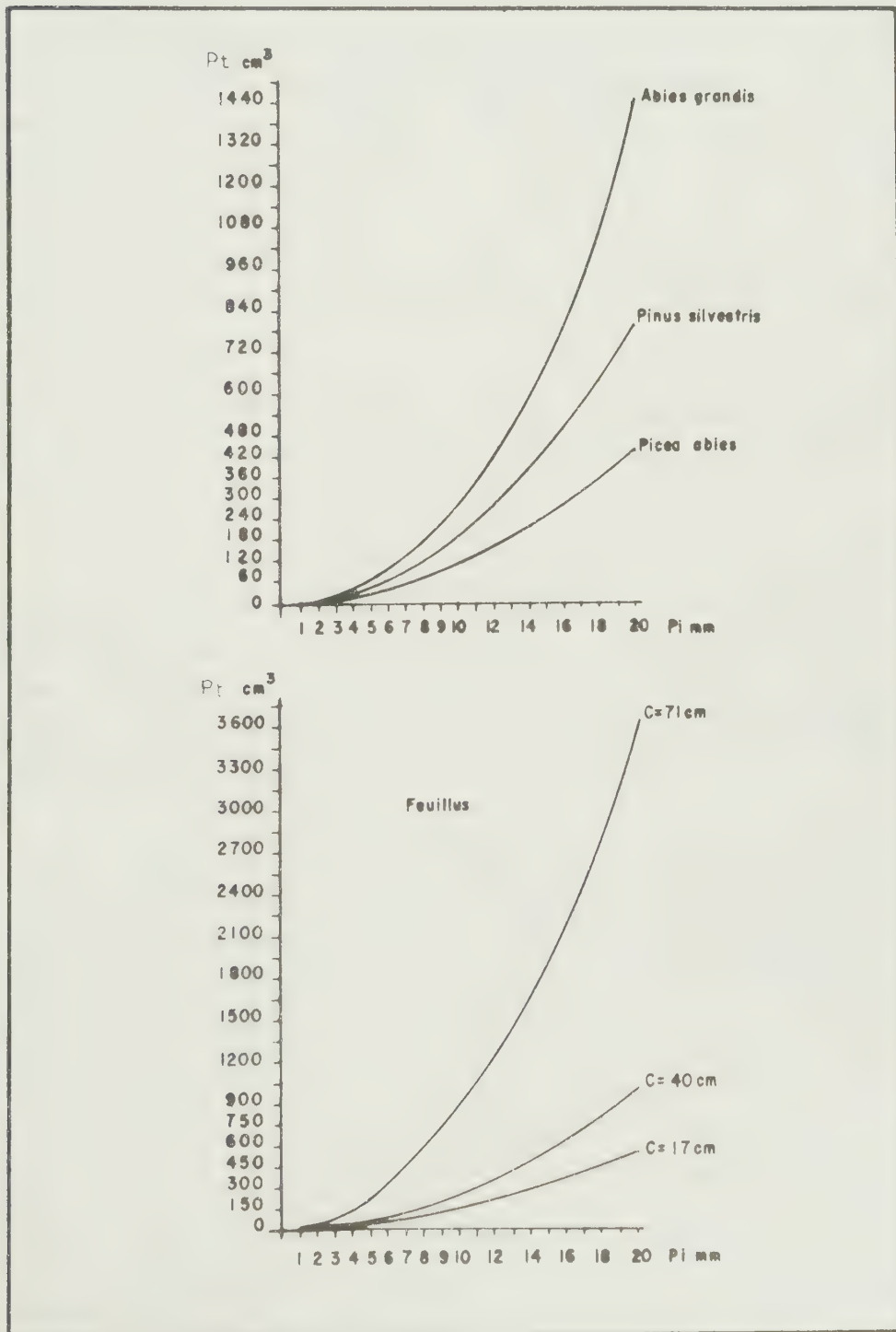
P_i = précipitation incidente

$L N$ = Logarithme népérien.

L'introduction de la circonférence est significative pour le peuplement feuillu et Abies grandis, mais cela n'est pas le cas pour Pinus sylvestris et Picea abies. Ce résultat doit être lié à une distribution réduite des classes de diamètre pour ces deux derniers peuplements.

La figure n° 19 montre aussi l'influence de la circonférence sur l'écoulement le long des troncs. SCHNOCK (1970) a trouvé aussi des corrélations positives. Par contre, plusieurs auteurs n'ont pas noté cette relation. Notre expérience personnelle et l'examen des caractéristiques des peuplements étudiés nous conduit à penser que cela peut être attribué au fait qu'il s'agissait souvent de peuplements jeunes, issus de plantations et présentant une dispersion réduite des classes de diamètre. Enfin, souvent l'échantillonnage était trop faible.

FIGURE 19
RELATION ENTRE L'ECOULEMENT LE LONG DES TRONCS (Pt)
ET LES PRECIPITATIONS INCIDENTES (Pi). Forêt d'Amance.



2° - Influence de l'essence

Le tableau n° 8 rapporte les écoulements (Pt) relevés dans l'ensemble des peuplements étudiés. De grandes différences apparaissent nettement de 0,28 % à 15 % des précipitations incidentes. Abies grandis, Picea abies, Pinus sylvestris et Quercus sessiliflora ont des écoulements très faibles. Par contre, Fagus silvatica et Pseudotsugamenziesii ont des écoulements très importants. Chez les feuillus, l'écoulement est proportionnellement plus fort en hiver qu'en été. Ceci est dû au fait qu'en hiver, les précipitations incidentes frappent directement les branches et le tronc et que les écorces restent plus longtemps humides et gorgées d'eau qu'en été où l'évaporation est beaucoup plus rapide. Le pourcentage d'écoulement est vraiment une caractéristique de l'espèce.

En effet, les espèces à port fastigié et à écorce lisse comme le Hêtre, ont une aptitude particulière à avoir des écoulements le long des troncs importants.

La comparaison des écoulements exprimés en hauteur d'eau au sol (en mm) ne permet pas de se rendre compte de leur importance relative pour les différentes espèces, puisqu'il s'agit de la quantité d'eau totale ramenée au sol par l'ensemble des troncs de la parcelle étudiée et que la densité du peuplement (nombre tiges/ha) intervient ainsi que nous le verrons dans le chapitre suivant.

Dans les quatre peuplements étudiés en Forêt d'Amance, nous avons calculé l'écoulement le long des troncs en litre/ha (*tableau n° 10*) et en litre pour l'arbre moyen de chaque placeau. L'écoulement par arbre est le plus fort chez les feuillus, suivi de Abies grandis, arrivent ensuite : Pinus sylvestris et Picea abies.

TABLEAU N° 10

ESTIMATION ANNUELLE EN LITRES DE L'ÉCOULEMENT LE LONG DES TRONCS
PAR ARBRE MOYEN ET PAR HA POUR LES QUATRE PEUPLEMENTS ÉTUDIÉS À
AMANCE

PERIODE	ABIES GRANDIS		PICEA ABIES		PINUS SYLVESTRIS		PEUPELEMENT FEUILLUS	
	arbre	ha	arbre	ha	arbre	ha	arbre	ha
	moyen (litres)	(litres)	moyen (litres)	(litres)	moyen (litres)	(litres)	moyen (litres)	(litres)
Mai 1965								
- Avril 1966	164,0	95 000	78,3	169 000	100,0	150 000		
Mai 1966								
- Avril 1967	132,0	71 000	62,0	134 000	76,0	114 000		
Juillet 1966								
- Juin 1967							161,9	510 000

Si au lieu de rapporter nos résultats à l'ensemble de la parcelle, nous ne considérons autour du tronc qu'une surface restreinte constituée par une couronne circulaire de 30 cm de large par exemple, on constate que "l'environnement" immédiat de chaque tronc reçoit des quantités considérables d'eau. Ainsi, chez les Pins Sylvestre, en plus de l'eau arrivant directement au sol (P_s), la zone proche des troncs a reçu en moyenne 225 mm d'eau pour l'année 1965-1966, chez les épiceas 192 mm, chez les sapins de Vancouver 284 mm et enfin chez les feuillus 453 mm. L'ensemble des deux composants $P_s + P_t$ pouvant alors donner localement des valeurs très supérieures aux précipitations incidentes (P_i). Le bilan hydrique local est alors très excédentaire et favorise le développement de mousses par exemple.

Aux espèces à écoulement important étudiées ici, on peut ajouter l'érable champêtre (Acer campestre), le charme (Carpinus betulus), SCHNOCK (1970), le Tilleul (Tilia cordata) (AUSSENAC observation non publiée).

3° - Influence de la densité du peuplement

L'écoulement le long des troncs est fortement influencé par le nombre de tiges (densité) ainsi que nous le montrent les résultats obtenus dans les 4 peuplements de Douglas (Forêt d'Amance). La figure n° 17 indique que l'écoulement, au niveau de chaque placeau, augmente avec le nombre de tiges, puisqu'il passe de 6,2 % pour la densité la plus faible à 15,0 % pour la densité la plus forte.

L'examen de la figure n° 20 qui donne l'écoulement en fonction de la pluie incidente (P_i) permet de constater que le classement des placeaux se fait par densité croissante quelle que soit l'importance de P_i . Il est intéressant de remarquer que pour des pluies importantes, 30 mm par exemple, l'écoulement peut atteindre des pourcentages élevés, 24 % dans le placeau le plus dense.

Si maintenant nous étudions l'écoulement moyen par arbre, nous constatons alors qu'il augmente quand la densité diminue :

Numéro du Placeau	2	3	1	4
Densité (arbres/ha)	4.265	2.310	1.484	1.118
Ecoulement moyen par arbre (en litres)	161,9	239,8	236,7	253,5

Ce résultat fait bien apparaître l'importance de la circonférence de l'arbre, puisque à mesure que la densité diminue, la circonférence augmente. Il confirme l'influence de ce paramètre dendrométrique.

Nous voyons ici qu'il faut toujours préciser le nombre de tiges/ha quand on donne une valeur d'écoulement, il en est d'ailleurs de même bien sûr pour P_s .

FIGURE 20

RELATION ENTRE L'ECOULEMENT LE LONG DES TRONCS (% P_i)
ET LES PRECIPITATIONS INCIDENTES.

(Pseudotsuga Menziesii). Forêt d'Amance.



4° - Influence de l'âge

L'influence de l'âge du peuplement est complexe, car elle fait intervenir à la fois la densité (nombre de tiges/ha) et la dimension des arbres.

La figure n° 18 montre comment varie l'écoulement avec l'âge de la hêtraie. On peut remarquer qu'au niveau des peuplements, dès l'âge de 50 ans, l'écoulement le long du tronc varie peu (pour l'année, de 11,8 % à 15,00 %). Cependant, si on calcule l'écoulement moyen par arbre, on s'aperçoit qu'on arrive à des chiffres très différents :

Age (ans)	30	45	80	120	120
Densité (arbres/ha)	1.300	2.583	933	376	230
Écoulement moyen (litres/arbre)	162	266	728	2.800	3.580
Situation	Amance	Haye IV	Haye III	Haye I	Haye II

Dans les deux peuplements âgés de 120 ans, nous voyons apparaître l'influence de la dimension des arbres. L'écoulement moyen est plus élevé dans la parcelle II (Hêtre - Forêt de Haye) 3.580 litres, que dans la parcelle I qui a une densité plus élevée 2.800 litres et donc des troncs de circonférence moyenne plus faible (*voir tableau n° 1*).

c) Interception des précipitations

Dans les chapitres précédents, nous avons étudié la redistribution au sol des précipitations en analysant les deux fractions P_s et P_t . Nous avons vu que la différence entre les précipitations incidentes (P_i) et la somme $P_s + P_t$ constituait ce que nous appelons l'interception nette (équation n° 5). Il s'agit donc de la fraction qui est arrêtée par les feuilles les branches, les troncs et qui n'atteint pas le sol.

La fraction interceptée est aussi influencée par l'ensemble des facteurs qui conditionnent l'importance et la répartition de P_s et de P_t . Il est cependant intéressant de montrer comment cette résultante varie avec les différents facteurs et de faire apparaître un certain nombre de phénomènes que nous n'avions pas étudiés dans les chapitres précédents.

1° - Etude générale du phénomène

D'une façon générale, l'interception de même que P_s et P_t est lié à l'importance des précipitations incidentes (P_i). Quand ces dernières augmentent, I augmente aussi, mais proportionnellement moins. Autrement dit, la valeur relative de l'interception nette diminue avec l'importance et la durée des précipitations incidentes (AUSSENAC 1967).

Pour des précipitations très faibles, en général inférieures à 1 mm, (*voir au paragraphe suivant*), l'interception est totale (100 %). Nous avons pu faire apparaître et définir (AUSSENAC 1967) un paramètre important : la capacité de saturation des couronnes. En effet, il existe une hauteur d'eau maximum, susceptible d'être retenue par les houppiers. Elle est fonction de la surface foliaire, de la surface de branches et des troncs de la morphologie des feuilles et du type de ramification.

Au début d'une averse, la plupart des gouttes sont interceptées. L'eau s'étend alors sur les surfaces végétales encore sèches et s'accumule jusqu'à ce que la capacité de stockage maximum soit atteinte, c'est-à-dire jusqu'à ce que les tensions superficielles soient dépassées par la force de pesanteur. Les phénomènes d'évaporation interviennent au début de l'averse car les températures de surface de feuilles peuvent être plus élevées que la température de l'air qui de surcroît peut présenter à ce moment un déficit de saturation. Avec le développement de l'averse, ces phénomènes s'atténuent très rapidement. Finalement, quand la capacité de saturation est atteinte, les couronnes ne retiennent plus que les quantités additionnelles nécessaires à la compensation de l'eau éventuellement évaporée. Si l'averse continue, les peuplements n'interceptent pratiquement plus. Le couvert n'a alors qu'un rôle mécanique de redistribution de la pluie au sol et le long des troncs.

Pour évaluer cette capacité de saturation maximum, nous avons recherché les averses importantes qui n'ont pas présenté d'interruption et qui sont tombées la nuit. En effet, pendant la nuit, l'évaporation est extrêmement faible. Les valeurs suivantes ont été obtenues pour les peuplements de la Forêt d'Amance : Abies grandis $3,1 \pm 1,5$ mm - Picea abies $3,1 \pm 0,8$ mm - Pinus sylvestris $3,0 \pm 0,8$ mm - peuplement feuillu $1,9 \pm 0,5$ mm.

L'examen des résultats obtenus montre que pour une même hauteur d'eau tombant sur les peuplements, l'interception est beaucoup plus importante si la pluie tombe en petites averses entrecoupées de période de temps clair (*tableau n° 11*). En effet, pendant la période sans pluie, l'eau interceptée s'évapore et le "réservoir" couronne est à nouveau disponible pour se recharger et ainsi de suite.

Ces phénomènes sont extrêmement importants et ils peuvent entraîner sur l'année entière des différences d'interception considérables selon les caractéristiques climatiques.

TABLEAU N 11 INFLUENCE DU TYPE D'AVERSE SUR L'IMPORTANCE DE
L'INTERCEPTION I_N

	DATE	PRECIPITATIONS	INTERCEPTION (I_N) (mm)			
		INCIDENCES	ABIES GRANDIS	PICEA ABIES	PINUS SYLVESTRIS	FEUILLUS
		P_1 mm				
Interception	6. 9.1965	17,8	6,8	6,2	5,5	
(mm)	1.10.1965	22,4	7,4	4,5	4,3	
pour des	6.12.1965	21,9	8,0	5,0	4,8	
averses	5. 7.1966	18,4	5,2	6,0	5,1	
discontinues						
Interception	2. 8.1966	11,5	2,7	2,9	2,6	1,6
(mm)	3. 8.1966	13,0	4,3	3,9	3,6	2,8
pour des	19. 8.1966	32,5	4,8	-	3,9	-
averses	30. 8.1966	9,1	3,4	2,9	2,8	1,2
continues	13. 9.1966	5,2	-	2,8	2,4	1,6
	13. 5.1967	7,4				2,3
	16. 5.1967	11,0				1,6
	25. 5.1967	6,2				2,5

Nous avons pu étudier cet effet du climat en considérant les diagrammes de répartition de la fréquence des hauteurs de précipitation journalière dans plusieurs régions de France et en calculant à partir des courbes caractéristiques des peuplements (*voir figure n° 13*) les pourcentages d'interception. Le tableau n° 12 donne pour l'année 1966 les pourcentages annuels pour différentes régions de France. On peut remarquer que les pourcentages les plus faibles se situent dans les régions où les pluies ont une forte intensité (régions méridionales) et les régions où les précipitations ont souvent un caractère orageux (Est, Massif Central).

2° - Influence de l'espèce

L'espèce a une grande importance et le tableau n° 8 montre que dans l'ensemble les résineux interceptent plus que les feuillus, que cela soit l'été ou l'hiver. Chez les feuillus, la différence entre l'été et l'hiver est de l'ordre de 5 %. La différence est relativement faible et montre l'importance du rôle joué par la surface des branches et des troncs. La comparaison entre espèce est cependant compliquée par l'influence de la densité et de l'âge des peuplements.

3° - Influence de la densité du peuplement

Ainsi que nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, la densité a une grande influence sur les précipitations au sol (P_s) et sur l'écoulement le long des troncs (P_t). Par voie de conséquence, elle a aussi une grande influence sur l'interception. Chez Pseudotsuga menziesii, la figure n° 17 montre comment varie I_n quand la densité varie.

Rappelons qu'il s'agit de 4 peuplements à couverts fermés, mais où le nombre de tiges est différent. On remarque que, bien qu'il y ait des différences pour P_s et P_t , l'interception (I_n) est très proche dans les 4 peuplements, dans le détail quand même, le pourcentage d'interception augmente cependant avec la densité. Les différences sont de l'ordre de 4 %. Ainsi, dans des peuplements à couverts fermés, la densité (nombre tiges/ha) joue un rôle important surtout dans la redistribution de l'eau de pluie au sol.

TABLEAU N° 12

POURCENTAGE D'INTERCEPTION DANS DIFFÉRENTES RÉGIONS DE FRANCE

Calculs effectués à partir des caractéristiques des peuplements étudiés à Amance et de la fréquence des précipitations dans les différentes stations météorologiques (1)

STATIONS	ABIES GRANDIS	PICEA ABIES	PINUS SYLVESTRIS	FEUILLUS
<u>Beauvais</u>	46,4	47,3	33,3	22,3
Bourges	44,5	45,7	32,1	21,7
Le Mans	45,1	43,1	30,1	20,1
Belfort	41,5	42,6	29,5	19,8
Alençon	40,9	42,0	29,1	19,4
Le Puy en Velay	40,9	41,7	29,2	19,9
Rostrenen	39,7	40,7	28,0	18,8
Limoges	39,7	40,3	27,9	18,8
Millau	38,9	39,7	27,3	18,6
Carcassonne	37,5	38,2	28,4	17,1
Gourdon	35,7	37,8	24,9	16,2
Château-Chinon	33,8	34,5	23,3	15,0
Perpignan	33,3	33,8	22,6	15,4
<u>Bitche</u>	33,0	33,7	22,6	14,8

(1) Stations classées par pourcentage d'interception décroissant

4° - Influence de l'âge

Nous avons déjà vu chez le Hêtre que l'âge avait une influence sur P_s et P_t , il a aussi une influence importante sur I_n . La figure n° 18 montre comment évolue le pourcentage d'interception en fonction de l'âge. On voit que, après 45 ans, l'augmentation devient faible et qu'il est très voisin dans les parcelles étudiées.

3 - Cas des peuplements ouverts

Dans le cas des peuplements ouverts, la redistribution de l'eau et l'importance de l'interception dépendent des caractéristiques du peuplement et du degré d'ouverture.

Pour étudier ces phénomènes, nous avons utilisé des peuplements éclaircis par des opérations sylvicoles, une clairière, et enfin des bandes forestières.

a) Les peuplements éclaircis

Les éclaircies dans les peuplements forestiers sont des opérations classiques qui, dans nos pays, conditionnent et influencent fortement le développement des forêts. Ces opérations sylvicoles ont une influence sur la redistribution au sol des précipitations au sol, l'écoulement le long des troncs et bien entendu l'interception.

Nous avons abordé ce problème dans un peuplement de chêne (Quercus sessiliflora) arrivé en fin de révolution à Bellême (Orne) où nous avons étudié quelles étaient les différences occasionnées par des coupes préparatoires à la régénération. En fait, nous avons retenu quatre traitements : 1 témoin (peuplement d'origine) et 3 intensités croissantes d'éclaircie (*voir tableau n° 1*).

Sur la figure n° 21 sont reportées les variations annuelles de P_s , P_t et I_n en fonction du nombre de tiges. L'effet de l'intervention sylvicole est net. Les précipitations au sol (P_s) varient pour l'année de 81,4 % dans le plateau le plus fortement éclairci à 73,75 % dans le témoin (tableau n° 8). Ce pourcentage correspond à un apport supplémentaire d'eau annuel de 53 mm. En été, il est de 43 mm, ce qui n'est pas négligeable pour les jeunes semis de chêne, si l'on considère que, à Bellême, le déficit annuel moyen est de 98 mm. La variabilité des précipitations (P_s) augmente avec l'intensité de l'éclaircie.

Cette dernière a une action non négligeable sur l'écoulement le long des troncs (P_t) au niveau du peuplement. On remarque dans le tableau n° 8 que le pourcentage d'écoulement diminue avec l'importance de l'éclaircie. Il passe de 0,25 % dans le plateau I le plus fortement éclairci, à 1,32 % dans la placette témoin.

En ce qui concerne l'interception nette (I_n) calculée selon la formule (5), des différences marquées se font jour. Ainsi, pour la période d'étude (été + hiver), I_n passe de 24,93 % dans le témoin, à 18,35 % dans le plateau I, soit une différence de 50 mm qui constitue l'apport supplémentaire d'eau. Ce chiffre relativement faible tient à l'importance du matériel (volume de bois) restant encore sur pied dans les parcelles éclaircies.

b) La clairière

L'ouverture naturelle ou artificielle d'une clairière a pour effet de faire varier l'importance et la distribution des précipitations au sol. L'influence de la clairière dépendra bien entendu de sa dimension et surtout du rapport :
$$\frac{\text{Diamètre de la clairière (D)}}{\text{Hauteur du peuplement environnant (H)}}$$

Nous avons étudié ces phénomènes en Forêt domaniale d'Amance, dans une clairière de 26 m de diamètre avec un peuplement feuillu environnant d'une hauteur de 13 m, soit un rapport $\frac{D}{H} = 2$. L'étude a été effectuée d'Avril 1967 à Décembre 1971. La pluviométrie a été mesurée dans 4 situations :

FIGURE 21

INFLUENCE DE L'ECLAIRCIE : VARIATION DES PRECIPITATIONS
AU SOL (P_s) ET DE L'INTERCEPTION NETTE (I_n) EN FONCTION
DU NOMBRE DE TIGES PAR HECTARES.

Quercus Sessiflora; Forêt de Bèllème.



Nord, Sud, Est et Ouest. Les pluviomètres étaient installés à 6 mètres du bord de la clairière.

Le tableau n° 13 et le tableau annexe n° 7 donnent les précipitations recueillies dans ces différentes situations et dans la coupe rase qui, en l'occurrence, sert de référence et permet de faire une comparaison.

TABLEAU N° 13

VALEURS MOYENNES (SUR LA PERIODE 1967-1971) DE LA
PLUVIOMETRIE DANS LA CLAIRIERE EN POURCENTAGE DES VALEURS
DE LA COUPE RASE

SITUATION	MOIS	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	année
COUPE RASE		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
CLAIRIERE NORD		98,3	99,2	95,1	95,8	97,4	98,8	97,8	96,5	100,1	97,8	94,1	98,2	97,2
CLAIRIERE SUD		98,0	95,1	94,6	97,0	84,5	98,8	98,6	96,6	97,3	95,4	93,7	97,2	95,4
CLAIRIERE EST		100,3	97,7	98,1	99,0	99,3	100,2	100,1	104,9	98,7	97,8	98,8	99,6	99,0
CLAIRIERE OUEST		93,6	88,1	81,9	89,4	85,2	91,0	87,6	88,6	91,4	83,8	86,1	89,3	88,2

On remarque que sur l'année et pour l'ensemble de la période d'étude, les précipitations qui ont été recueillies sont plus importantes dans la coupe rase que dans la clairière. Mais, pendant les mois d'hiver ou d'automne : Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars, il n'en est pas de même,

puisque l'on remarque qu'à ce moment là : le Nord, le Sud et l'Est peuvent recevoir des pluviométries supérieures à la coupe rase. Le tableau n° 13 calculé sur la période 1967 - 1971, donne les précipitations en pourcentage de la pluie en plein découvert. Ainsi, pour l'année, on relève au Nord 97 %, au Sud 95,4 %, à l'Est 99 %, à l'Ouest 88,2 %.

D'une façon générale dans la clairière, il pleut plus à l'Est (c'est-à-dire en exposition Ouest) que dans les autres situations. Des résultats du même ordre ont été présentés par SLAVIK et al (1957). La pluviométrie est la plus faible à l'Ouest, car dans cette situation, la lisière du peuplement intercepte fortement les précipitations qui se produisent la plupart du temps par vent du Sud-Ouest. En hiver, pendant la période où les feuillus sont défeuillés, l'interception est moins forte et les précipitations sont beaucoup plus homogènes.

En résumé, dans cette clairière, les précipitations sont dans l'ensemble inférieures aux précipitations mesurées en plein découvert. Il est probable bien entendu que la forme et la dimension des éclaircies interviennent, mais il est clair quand même que la pluviométrie à l'intérieur d'une clairière est fortement influencée par le peuplement environnant.

Les résultats obtenus par KRECMER (1968) en Tchécoslovaquie, par CONSTANTINESCU et al (1968) en Roumanie et nos propres résultats, nous conduisent à penser qu'au delà du rapport $\frac{D}{H} = 2$, les précipitations recueillies au centre et à l'est d'une clairière ^H (1) doivent dépasser les précipitations recueillies en plein découvert. On retrouvera ce plein phénomène d'augmentation des précipitations dans le paragraphe suivant.

Cette augmentation est probablement due à une amélioration du coefficient de captation du pluviomètre. Il s'agit donc d'un artefact qui vient du fait qu'en plein découvert à cause d'une vitesse plus grande du vent on évalue par défaut les précipitations.

(1) Nous nous plaçons ici dans le cas d'un régime de vent S.W. amenant la majorité des précipitations.

c) Cas des bandes forestières

De même que dans le cas des clairières, l'ouverture du couvert par déboisement en bandes, modifie l'importance et la répartition des précipitations. Ici encore, l'influence de la bande dépend de sa dimension, c'est-à-dire du rapport largeur de la bande et de son

hauteur de l'interbande feuillée
orientation. Nous avons effectué une étude comparative des précipitations dans deux types de bande (*tableau n° 1*) (rapport $\frac{L}{H} = 1,12$ et $3,36$), par rapport au plein découvert (AUSSENAC 1973).

La figure n° 15 donne à la fois la situation d'ensemble du dispositif expérimental installée en Forêt d'Epinal et la position des postes de mesure dans les différentes bandes étudiées. Ces bandes ont une orientation Nord - Nord-Ouest et Sud Sud-Ouest et leur longueur moyenne est de 170 mètres. Elles sont sensiblement orientées perpendiculairement aux vents dominants.

Les figures n° 6, 7 et 8 et le tableau n° 14 donnent pour les deux types de bande les résultats obtenus. Les précipitations sont exprimées en pourcentage du plein découvert. Trois périodes sont considérées : du 1 mai au 20 mai 1970 et enfin du 14 au 30 Avril 1971, moment où les interbandes sont encore défeuillées, du 29 Juillet au 1er Septembre 1971, où les interbandes sont alors feuillées.

Pendant la période défeuillée, les précipitations dans les deux types de bande sont dans l'ensemble plus élevées qu'en plein découvert. Une zone de réduction due à l'interception des lisières existe surtout à l'Ouest. Cet effet est sensible jusqu'à 10 mètres de cette lisière Ouest. Pendant l'été (période feuillée), l'effet d'interception des lisières est plus important et se fait sentir dans l'ensemble des bandes. Les lisières Ouest sont les plus influencées et on y relève des précipitations plus faibles qu'en plein découvert : dans la bande B 4 : 81 %, dans la bande B 2 : 84 % seulement du plein découvert.

TABLEAU N° 14

TABLEAU COMPARATIF DES BANDES

Pluie P en mm et % de la coupe rase (CR)

EMPLACEMENT		Période du 14.4. au 30.4.71		Période du 1.5. au 20.5.71		Période du 29.7. au 1.9.71	
		P mm	P% CR	P mm	P% CR	P mm	P% CR
COUPE RASE		9,8	100,0	36,0	100,0	152,1	100,0
B 1	Poste 1	10,9	111,0	38,4	106,6	152,7	100,3
	Poste 2	8,7	88,7	36,3	100,8	157,9	103,8
	Poste 3	11,1	113,2	37,9	105,2	157,4	103,4
B 2	Poste 4	11,1	113,2	38,0	105,5	159,9	105,1
	Poste 5	11,6	118,3	38,7	107,5	157,9	103,8
	Poste 6	9,7	98,9	36,4	101,1	129,0	84,8
B 3	Poste 7	10,	110,2	41,9	116,3	157,4	103,4
	Poste 8	11,2	114,2	38,3	106,3	157,6	103,6
B 4	Poste 9	11,3	115,3	37,9	105,2	156,6	102,9
	Poste 10	10,4	106,1	36,8	102,2	123,5	81,1
	Poste 11	11,4	116,3	38,5	106,9	158,7	104,3
B 6	Poste 12	11,2	114,2	38,5	106,9	156,0	102,5
	Poste 13	10,6	108,1	38,3	106,3	152,7	100,3
B 7	Poste 14	11,5	117,3	38,4	106,6	154,9	101,8

L'augmentation relative des précipitations a d'ailleurs été signalée par KARSCHON (1965) dans le cas de brise-vent simples et par KRECMER (1970) pour une bande orientée Sud-Est Nord-Est. La diminution de la vitesse du vent dans la zone protégée peut expliquer l'augmentation des précipitations. Mais, ainsi que nous le disions déjà au paragraphe précédent, on peut penser (1) que la diminution de la vitesse augmente le coefficient de captation des pluviomètres (c'est-à-dire diminue la turbulence). Il en résulte alors une hauteur d'eau recueillie plus importante qu'en plein découvert.

Mais nous admettons que dans l'ensemble, la pluviométrie dans les bandes à rapport $\frac{H}{L} > 1$ est voisine à celle du plein découvert, sauf sur les lisières Ouest.

4 - Conclusion

Les travaux entrepris nous ont permis de chiffrer et préciser ainsi l'importance des différents paramètres de l'équation

$$(4) \quad P_i = P_s + P_t + I_n$$

En ce qui concerne les précipitations arrivant directement au sol (P_s), nous avons pu montrer, en analysant les différents facteurs écologiques et stationnels, le rôle déterminant de la structure du couvert. Cette dernière est bien sûr sous la dépendance de l'espèce, de l'âge et des éventuelles interventions sylvicoles ou accidents (chablis). Une conclusion générale apparaît, les précipitations arrivant directement au sol sont très différentes, selon les peuplements et très variables d'un point à un autre.

L'écoulement le long des troncs est un phénomène que certains auteurs ont considérés comme négligeable. En fait et nous l'avons montré, il peut représenter une fraction importante des précipitations incidentes. Il varie avec l'espèce. En combinant nos résultats et ceux de SCHNOCK (1970), nous pouvons caractériser les espèces de la façon suivante :

(1) Afin d'améliorer l'étude du phénomène, il aurait été nécessaire d'analyser les résultats en fonction du type de temps et de la direction du vent. Malheureusement, nous ne disposons pas du matériel nécessaire pour faire les observations.

Ecoulement fort

- . Fagus silvatica
- . Carpinus betulus
- . Tilia cordata
- . Acer platanoides
- . Pseudotsuga menziesii

Ecoulement faible

- . Quercus sessiflora
- . Quercus pedunculata
- . Abies alba
- . Abies grandis
- . Picea abies
- . Pinus silvestris

Au sein d'une même espèce, nous avons montré que l'écoulement varie avec la densité et l'âge. Ces variations sont liées à la dimension de l'arbre que nous avons synthétisé par la circonférence de 1,30 m. Dans certains cas, l'écoulement est considérable, ainsi pour des Hêtres de 120 ans et de 150 cm de circonférence, il atteignait 3.580 litres pour l'année.

La somme des deux fractions $P_s + P_t$ représente la hauteur d'eau totale qui arrive au sol dans les peuplements. Nous avons montré qu'il existait une grande variabilité dans le temps et l'espace. Cependant, l'analyse de l'ensemble des données recueillies dans nos expérimentations nous a conduit à penser qu'il existe une "loi de distribution" des précipitations sous le couvert (AUSSENAC 1970). Il est possible de tracer son schéma théorique (figure n° 22). Autour du tronc se trouve une zone très bien alimentée en eau (supérieure à P_i) grâce aux effets cumulés de l'écoulement (P_t), des précipitations arrivant directement (P_s) et éventuellement pour certaines espèces (REYNOLDS et al 1967 - AUSSENAC, 1970) d'un égouttement.

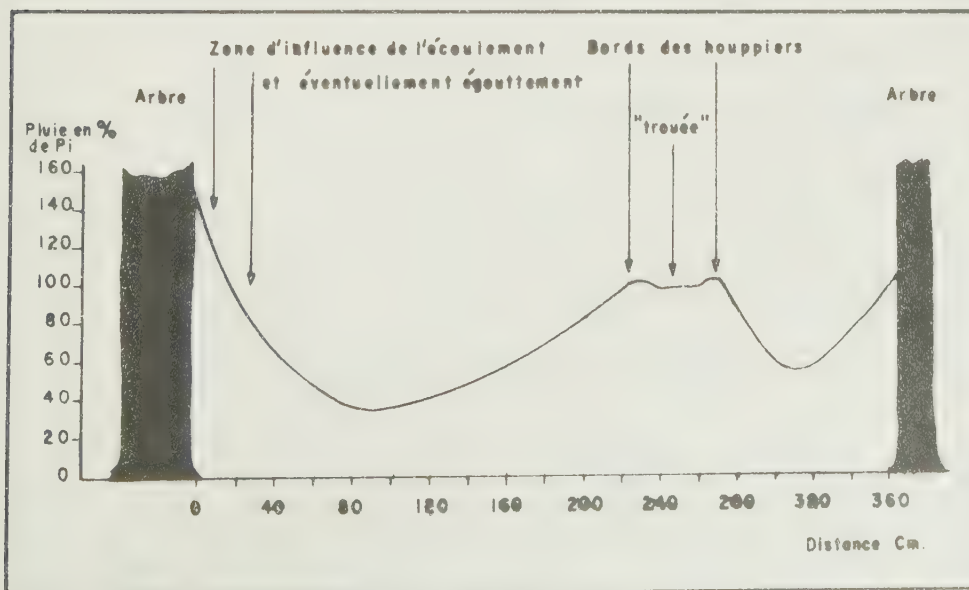


FIGURE 22
SCHEMA DE LA
DISTRIBUTION
DES PRECIPITATIONS
SOUS LE COUVERT
(P_s et P_t) ENTRE
DEUX ARBRES.

Ensuite, il y a diminution puis augmentation de la hauteur d'eau au sol (P_s) jusqu'à atteindre les valeurs des précipitations incidentes (P_i) dans les trouées séparant les arbres. La position du minimum d'eau au sol (P_s) varie selon qu'il s'agit d'une espèce à écoulement fort ou faible. Dans le premier cas, il se situera à partir du tronc vers le premier tiers de la projection au sol des houppiers. Dans le deuxième cas, il sera proche du fût. Nous verrons dans le chapitre suivant, l'importance de ces phénomènes pour la biologie des arbres et la forêt. Nous pouvons remarquer que localement au pied des troncs, le bilan hydrique est très excédentaire et favorise donc le développement de végétaux hygrophiles tels que les mousses par exemple.

L'interception (I_n) qui est la différence $P_i - (P_s + P_t)$ représente d'une façon générale une fraction importante des précipitations incidentes, puisque dans nos différentes placettes, elle a été comprise entre 19 % et 43 % de P_i . L'interception varie avec l'importance des précipitations incidentes et nous avons pu montrer à l'aide des données de plusieurs stations climatologiques française l'influence du climat général sur les pourcentages d'eau interceptée. Nous avons réussi à évaluer la "capacité de saturation maximum" des houppiers. Les valeurs obtenues sont relativement faibles.

Mais, la définition et l'évaluation de ce paramètre nous a finalement permis de mieux préciser le rôle réel du couvert dans les phénomènes d'interception :

- saturation progressive du feuillage jusqu'à la "capacité de saturation" ;
- action mécanique ensuite si l'averse continue ;
- évaporation si l'averse s'arrête, alors le couvert est à nouveau susceptible d'intercepter, si la pluie reprend.

L'espèce joue un rôle déterminant : les feuillus interceptent moins d'une façon générale que les résineux, non seulement en hiver, mais aussi en été. Il apparaît cependant que, pour effectuer des comparaisons valables, le rôle de l'espèce doit être interprété en prenant en compte à la fois la densité et l'âge.

L'ouverture du couvert a un rôle déterminant sur la distribution des précipitations. Les résultats que nous avons obtenus montrent les influences respectives de différents types d'ouverture des peuplements. En particulier, dans le cas des clairières et des bandes, le rapport $\frac{D}{H}$ ou $\frac{L}{H}$ est essentiel pour expliquer l'importance des précipitations au sol. Il apparaît qu'au-delà $\frac{D}{H} > 2$ pour la clairières et $\frac{L}{H} > 1$ pour les bandes. Les précipitations sont égales à celles du plein découvert, sauf près des lisières Ouest (1).

C. L'EVAPOTRANSPIRATION EN FORET

1 - Généralités

L'évapotranspiration d'un peuplement forestier correspond au flux d'eau qui quitte ce peuplement et diffuse dans l'atmosphère. Ce flux de vapeur d'eau est le résultat de l'évaporation au niveau du sol et des surfaces végétales internes, de la transpiration des organes végétaux vivants et aussi de l'évaporation de l'eau interceptée pendant les pluies.

Nous pouvons alors écrire :

$$(13) \quad ETR = E + T + I_n$$

E : Evaporation
T : Transpiration
 I_n : Eau interceptée.

A ce flux de vapeur d'eau correspond un flux de chaleur consommée par l'évapotranspiration.

$$(14) \quad Q = L E$$

cal⁻¹ cm⁻² s⁻¹

L : chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température considérée (t) ; jusqu'à 40° C, L est égal à 594.9 - 0,5 t.
E : flux de vapeur d'eau g⁻¹ cm⁻² s⁻¹.

(1) Nous sommes ici dans le cas d'un régime de vents du Sud-Ouest qui amènent la majorité des précipitations.

On distingue habituellement l'évaporation réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). La première (ETR) correspond au flux de vapeur réellement émis par le couvert forestier croissant dans les conditions normales de végétation. Sous le nom d'évapotranspiration potentielle (ETP), on entend la quantité maximale d'eau qu'un couvert végétal couvrant bien le sol peut perdre lorsque ce dernier est constamment bien approvisionné en eau. Dans ce cas, l'évapotranspiration n'est conditionnée que par l'énergie calorifique disponible au niveau des surfaces évaporantes. En réalité et ceci a une grande importance, il faut tenir compte de l'échelle : suivant que l'on considère l'échelle macro ou microclimatique des variations importantes peuvent être notées. Dans la suite de ce travail, nous distinguerons l'évapotranspiration potentielle au niveau climatique (régional) et l'évapotranspiration potentielle microclimatique.

La mesure de l'évapotranspiration réelle est essentielle pour établir le bilan hydrique des peuplements forestiers et compléter ainsi l'étude des influences qu'ils exercent sur le cycle de l'eau dans la nature. A l'heure actuelle, ces influences ne sont pas encore très clairement connues en raison du rôle complexe des composantes climatiques et des caractéristiques des peuplements (AUSSENAC, 1970). Cependant, les mesures d'évapotranspiration réelle qui ont été déjà effectuées et celles qui sont en cours dans différents pays du monde devraient permettre, dans l'avenir, de faire avancer considérablement ce problème.

L'évapotranspiration réelle peut être exprimée à partir de la formule de MONTEITH (1965) dérivée de la formule de PENMAN (1952)

$$(15) \quad LE = \frac{\Delta R_n + \rho c (e_s(T) - e) / r_a}{\Delta + \gamma [(r_a + r_s) / r_a]}$$

L : chaleur latente de vaporisation soit $590 \text{ cal}^{-1} \text{ cm}^{-3}$

E : taux d'évaporation en $\text{cm}^{-3} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

: pente de la courbe de tension de vapeur saturante

R_n : rayonnement net $\text{cal}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

ρ : densité de l'air humide en $\text{g}^{-1} \text{ cm}^{-3}$

- c : chaleur spécifique ($0,24 \text{ cal}^{-1} \text{ cm}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
- $e_s(T) - e$ = déficit de saturation en millibars, dans l'air à une hauteur z .
- r_a : résistance (1) à la diffusion de la vapeur d'eau dans l'air en $\text{sec}^{-1} \text{ cm}^{-1}$
- r_s : résistance à la diffusion de la vapeur d'eau dans la feuille en $\text{sec}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.
- γ : constante psychométrique égale à $0,66 \text{ mb } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Dans cette formule interviennent à la fois des facteurs caractéristiques de l'état de l'atmosphère et aussi des paramètres dépendant du végétal : les résistances internes r_s . Le rayonnement net (R_n) et la résistance dans l'air (r_a), dépendent à la fois des facteurs climatiques et des caractéristiques du couvert.

Sur le terrain, l'évaluation de l'évapotranspiration réelle des peuplements forestiers est une opération très difficile. Ces difficultés tiennent aux dimensions, à l'hétérogénéité et à la situation topographique des formations forestières. De ce fait, plusieurs méthodes d'évaluation de ETR sont utilisées.

En théorie, les meilleures méthodes sont celles qui évaluent directement le flux de vapeur d'eau qui quitte le couvert forestier. On peut citer par exemple la méthode aérodynamique. En atmosphère stable, la diffusion de la vapeur d'eau est principalement déterminée par la turbulence l'air. Au-dessus du couvert il existe un gradient de température auquel est associé un flux de vapeur d'eau. Ce dernier est évalué au moyen d'équations qui prennent en compte à chacun des niveaux de mesure: la température de l'air, la tension de vapeur d'eau et la vitesse du vent. En pratique, cette méthode est difficilement utilisable en forêt car, outre le fait qu'elle nécessite des installations spéciales (matériel électronique, pylône d'une hauteur double des peuplements) elle suppose des peuplements dont la structure (hauteur, densité) est homogène sur une grande surface (plusieurs hectares). Cette dernière condition est en réalité difficile à satisfaire.

(1) Le concept de résistance a été introduit en physiologie végétale par BROWN et ESCOMBE en 1900. Il est basé sur les analogies électriques :

$$\text{Flux} = \frac{\text{différence du potentiel}}{\text{résistance}}$$

Il existe aussi une autre méthode microclimatologique : la méthode du bilan d'énergie. Elle consiste à calculer l'énergie consommée par l'évapotranspiration. Elle nécessite le calcul du rapport de BOWEN $\left(\frac{\text{flux de convection : chaleur sensible}}{\text{flux d'évaporation}} \right)$ par une formule qui suppose l'égalité des coefficients de diffusibilité de la chaleur et de la vapeur d'eau. Cette égalité est d'autant moins réalisée que la couche d'air au-dessus de la surface évaporante est instable. La méthode nécessite aussi d'une part des installations expérimentales relativement complexes et d'autre part, des peuplements homogènes sur de grandes surfaces.

D'autres méthodes s'appuient sur l'équation du bilan hydrique (équation n°3). A partir de cette formule, il est possible d'écrire : (16) $ETR = P_i - D - F - R + \Delta S$ avec $ETR = E + T + I_n$. Pour une période donnée en général la saison de végétation, on évalue P_i , D , F , R et ΔS et on calcule ensuite ETR. Ces méthodes sont utilisables pour des bassins versants ou des cases lysimétriques. Leur principal inconvénient est qu'elles n'évaluent pas directement ETR. En partant de l'analyse des différentes méthodes utilisables et compte-tenu du programme de recherche que nous nous étions assignés à savoir l'étude comparative de l'évapotranspiration réelle de stations différentes par la nature et l'importance du couvert, nous avons développé une méthode originale basée sur l'utilisation de "lysimètres naturels"

2 - Méthode d'étude utilisée

Nous avons évalué l'évapotranspiration de plusieurs types de couverts (tableau n° 1).

- futaie de Pin Sylvestre (Pinus sylvestris - 29 ans)
- futaie d'Epicea (Picea abies - 24 ans)
- futaie de Sapin de Vancouver (Abies grandis - 33 ans)
- futaie de Hêtre et de Charme (Fagus silvatica + Carpinus betulus - 30 ans)
- clairière enrésinée
- coupe rase enrésinée.

tous localisés en forêt domaniale d'Amance.

Ils sont situés en terrain non accidenté sur un plateau et ils sont suffisamment proches pour qu'ils puissent être considérés comme étant placés dans des conditions climatiques générales identiques. Ces différents types de couvert sont installés sur des sols bruns lessivés marmorisés, (horizon d'engorgement à une profondeur moyenne de 60 cm) qui se sont développés sur des marnes liasiques recouvertes de limons. Pour ces sols, la réserve d'eau utile ($pF = 2,5$ à $pF = 4,2$) est voisine de 100 mm.

La caractéristique principale de substrat sur lequel sont installés les couverts étudiés est l'existence d'un horizon d'engorgement très compact développé sur des marnes liasiques. La présence de cet horizon imperméable a pour conséquence de limiter l'enracinement des arbres aux 70 premiers centimètres et aussi en freinant le drainage profond, de permettre le développement de nappes perchées temporaires. Nous nous trouvons alors en présence d'une situation que l'on peut qualifier de "lysimètre naturel". A partir de cette constatation, il est possible d'écrire que pour une période donnée (AUSSENAC, 1972) :

$$(17) \quad P_i = ETR + D + \Delta N$$

avec :

P_i = précipitations incidentes

ETR = évapotranspiration réelle

D = drainage profond et latéral

ΔN = variation du stock d'eau des nappes perchées.

La méthode que nous avons utilisée pour évaluer l'évapotranspiration réelle découle de la formule précédente, en considérant des périodes pour lesquelles au départ (début de la saison de végétation) et à la fin (fin de la saison de végétation) le sol est à la capacité au champ.

Il vient alors :

$$(18) \quad ETR = P_i - D + \Delta N$$

A partir de là, il est nécessaire d'évaluer les paramètres P_i , D et ΔN . En ce qui concerne les précipitations, les mesures ont porté aussi bien sur les précipitations incidentes P_i mais aussi, dans le cas des peuplements, sur les précipitations arrivant directement au sol ou ruisselant le

long des troncs (AUSSENAC 1968, 1970). Les résultats de ces mesures ont été déjà reportés dans le paragraphe précédent.

Pour ce qui est de la variation du stock d'eau des nappes perchées et du drainage, les fluctuations des nappes ont été étudiées à l'aide de tubes piézométriques installés dans le sol jusque dans l'horizon d'engorgement. Les piézomètres sont constitués de tube de 80 mm de diamètre en polyvinyle. Une technique voisine a été décrite par LEVY (1969). Ils sont percés de nombreux orifices pour permettre la circulation de l'eau. Ces tubes ont été installés dans des trous creusés à l'aide d'une tarière jusqu'à une profondeur de 75 cm, soit 15 cm en-dessous du niveau moyen de la partie supérieure du pseudogley.

Pour éviter à la surface du sol tout écoulement préférentiel le long des tubes, ces derniers sont entourés d'une collerette de polyéthylène. Le niveau à laquelle se trouve la nappe a été relevée deux fois par semaine. Connaissant la profondeur du trou, il a alors été possible de calculer l'épaisseur de la couche d'eau. Les fluctuations de niveau et l'épaisseur des nappes ne sont pas des données suffisantes pour résoudre l'équation (18) il faut connaître le stock d'eau. Pour calculer ce dernier paramètre, nous aurions pu utiliser la porosité totale. Mais en réalité, il est très difficile d'opérer de cette façon pour plusieurs raisons : - d'une part une grande variabilité des mesures de porosité totale pour un même traitement ; l'analyse statistique a d'ailleurs montré que pour une même profondeur les différences entre parcelles n'étaient pas significatives ;

- d'autre part, la porosité totale n'est pas totalement occupée par les nappes car il reste toujours de l'air emprisonné dans le sol. On peut simplement remarquer que la porosité totale diminue (*tableau n° 15*) avec la profondeur ; cela correspond à l'existence de l'horizon compact (Bg).

TABLEAU N° 15

VARIATION DE LA POROSITÉ TOTALE (% DU VOLUME)
AVEC LA PROFONDEUR

Profondeur (cm)	Porosité totale moyenne
10	56,4 $\pm$ 2,3
20	53,9 $\pm$ 2,4
30	51,8 $\pm$ 0,8
40	49,9 $\pm$ 1,3
50	49,8 $\pm$ 2,8
60	48,8 $\pm$ 2,3
70	49,0 $\pm$ 1,2
80	48,6 $\pm$ 1,9

Pour pallier à ces difficultés, nous avons prélevé des profils de sols dans les parcelles étudiées. Nous les avons reconstitués dans des containers cylindriques de 230 dm³ (Hauteur 87 cm, diamètre 58 cm). Ces containers sont pourvus d'un dispositif qui permet de suivre la position des nappes (*figure n° 23*). Après la mise en place des profils, le niveau de la surface du sol, dans les containers, a progressivement baissé par tassement naturel, puis au bout d'un an, s'est stabilisé. A ce moment là,

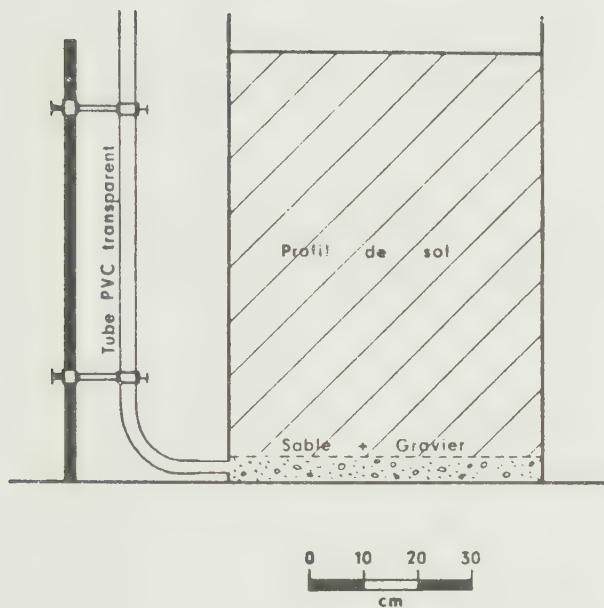


FIGURE 23

SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL
UTILISE POUR EVALUER L'EQUIVALENT
EN EAU DES NAPPES PERCHEES.

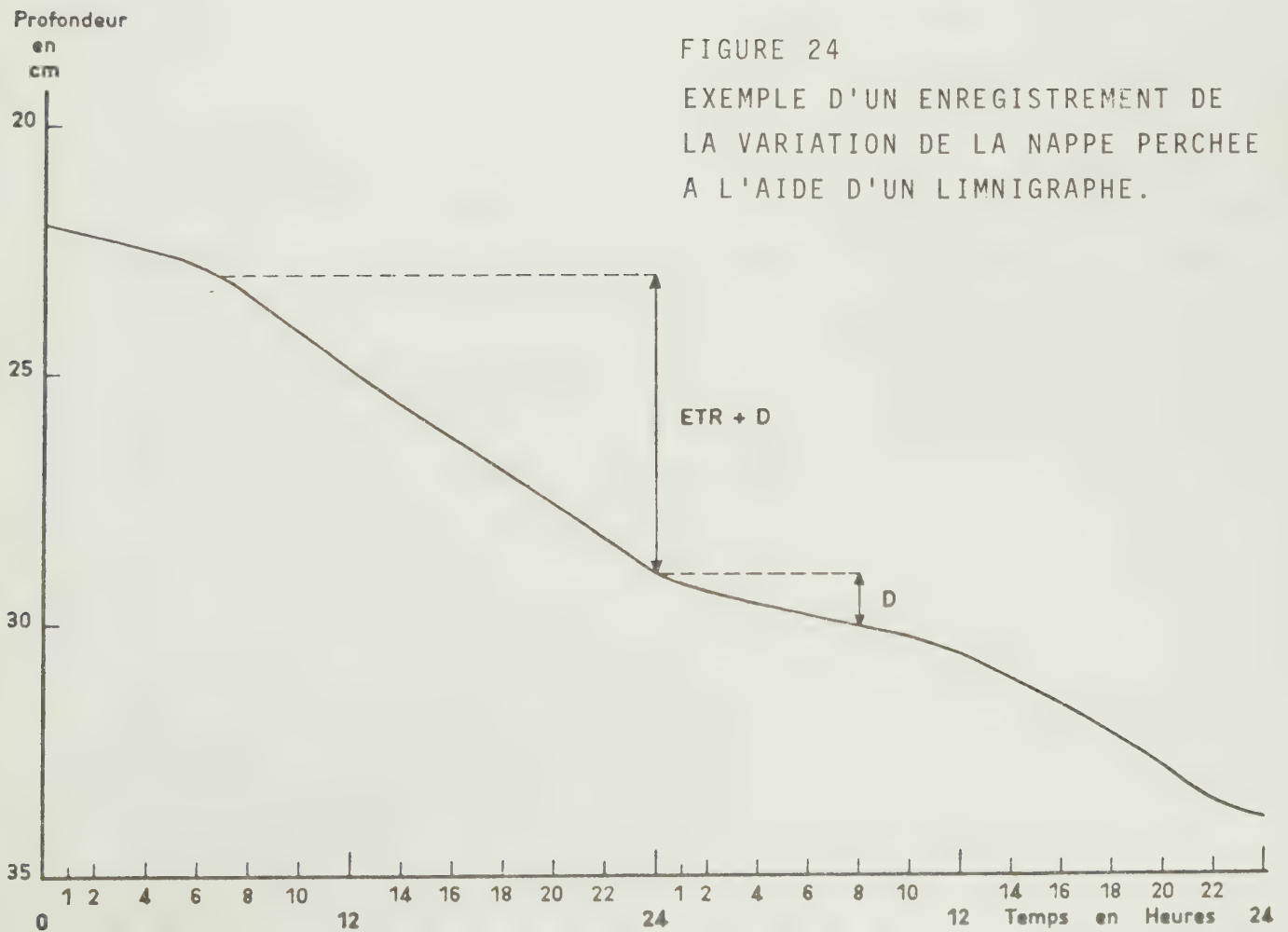


FIGURE 24

EXEMPLE D'UN ENREGISTREMENT DE
LA VARIATION DE LA NAPPE PERCHEE
A L'AIDE D'UN LIMNIGRAPHE.

nous avons estimé que la remise en place des profils était faite. Les mesures du stock d'eau des nappes ont pu être effectuées pour différentes profondeurs dans le sol.

Pour résoudre l'équation (18), il faut aussi évaluer les pertes par drainage qui se produisent quand les nappes perchées sont présentes. Pour mesurer l'importance du drainage, nous avons utilisé un limnigraphe qui a permis d'enregistrer les fluctuations des nappes.

En période de dessèchement et en l'absence de pluie, ces variations montrent nettement une phase diurne et une phase nocturne. Ce phénomène est visible sur la figure n° 24. En effet, en l'absence de pluie, l'abaissement des nappes est conditionné dans la journée par l'évapotranspiration réelle (ETR) et par les pertes par drainage (D) ; dans la nuit, le drainage intervient seul car l'évapotranspiration nocturne est pratiquement nulle (rayonnement global nul, déficit de saturation de l'air très faible, stomates fermés). Ainsi, à partir des enregistrements et des mesures de stock d'eau des nappes que nous avons effectués, nous avons pu évaluer la part du drainage dans l'abaissement des nappes.

Nous revenons maintenant à l'équation $P_i = ETR + D + \Delta N$ (1). Nous l'appliquons à la saison de végétation depuis un moment où le sol présente une nappe et est à la capacité au champ (début du printemps) jusqu'à une époque (automne) où après un dessèchement estival plus ou moins important, les nappes apparaissent à nouveau. Nous effectuons alors les calculs suivants : la somme des précipitations incidentes (P_i) pendant la période considérée, la somme des pertes par drainage (D) quand les nappes existent et enfin nous calculons la variation du stock d'eau (ΔN) des nappes qui existent au début et à la fin de la période étudiée. Enfin, nous effectuons pour cette période, le calcul suivant :

$$ETR = P_i - D - \Delta N$$

(1) Nous pouvons remarquer que ce calcul s'appuie sur le raisonnement suivant : si nous considérons un sol avec une nappe perchée, située à une profondeur z , la hauteur de pluie nécessaire pour que la nappe revienne au même niveau après une période de sécheresse est égale à la hauteur d'eau perdue par évapotranspiration et par drainage.

L'intérêt de cette technique originale à notre connaissance, est d'avoir utilisé les nappes perchées temporaires. En effet, les éléments de plâtre ou les tensiomètres ne sont pas suffisants pour déterminer la date où l'ensemble du profil est à la capacité au champ.

3 - Fluctuations des nappes perchées dans les placettes étudiées

Les mesures concernant les fluctuations des nappes ont commencé en 1967. Les figures n° 25, 26 et 27 donnent leurs niveaux respectifs pour les périodes comprises entre le moment où le sol est encore à la capacité au champ (1) (au printemps), mais la quitte, et le moment où il y revient (au automne ou en hiver). Pour l'année 1967, la période considérée va du 29 Mars au 10 Novembre, en 1968 du 26 Mars au 11 Novembre et en 1969 du 2 Avril au 21 Janvier 1970. Ces dates correspondent au moment où l'ensemble des 6 placettes se trouvent à la capacité au champ. (*figure n° 28*)

Cela était nécessaire pour effectuer les comparaisons entre les 6 placettes. Les périodes de sécheresse peuvent être différentes selon les stations, ainsi que le montre le tableau n° 16. L'examen des fluctuations, du niveau des nappes montre un cycle saisonnier identique ; mais, dans le détail, des différences importantes existent : dates d'apparition et de disparition des nappes, profondeur de la nappe au moment de son épaisseur maximum.

En particulier, il y a lieu de remarquer parmi les peuplements fermés (la futaie de Picea abies) où la nappe disparaît plus tard et apparaît plus tôt que dans les trois autres peuplements étudiés. C'est également chez les Epiceas qu'elle est la plus superficielle de toutes au moment de son épaisseur maximum. La coupe rase et la clairière se caractérisent très nettement. Cette dernière présente un nombre de jours sans nappes inférieur à la donnée comparable de la coupe rase. Ce critère de "nombre de jours sans nappes" n'est pas un critère absolu, car l'épaisseur de la nappe intervient, il permet quand même de caractériser les stations. Ainsi, pour les peuplements fermés, la durée de la période sans nappe va en décroissant dans l'ordre suivant : peuplement feuillu, Abies grandis, Pinus sylvestris, Picea abies.

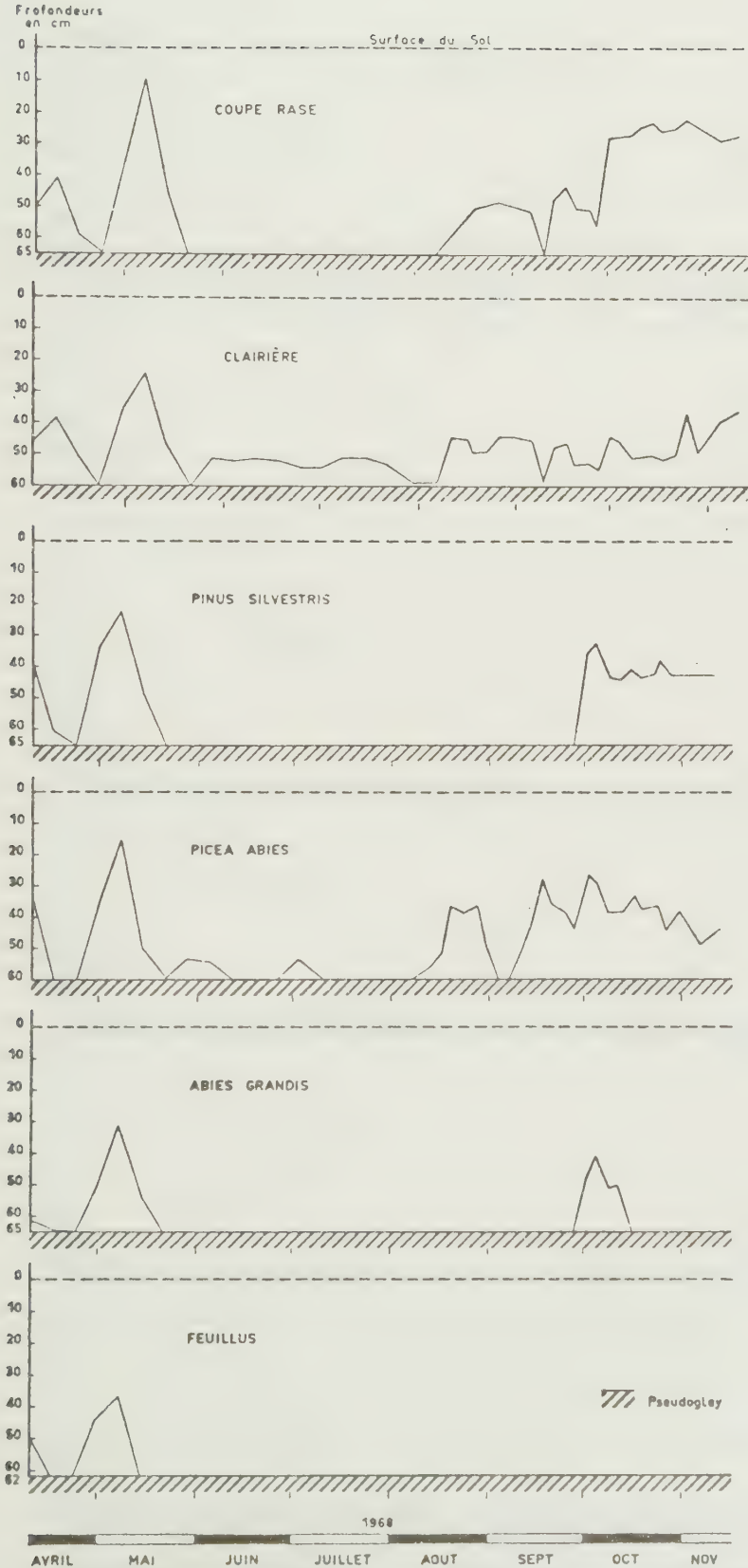


FIGURE 25
VARIATION DE LA
HAUTEUR MOYENNE
DES NAPPES
PERCHEES DANS
LES DIFFERENTS
MILIEUX ETUDIES.
(Forêt d'Amance)
- 1968 -

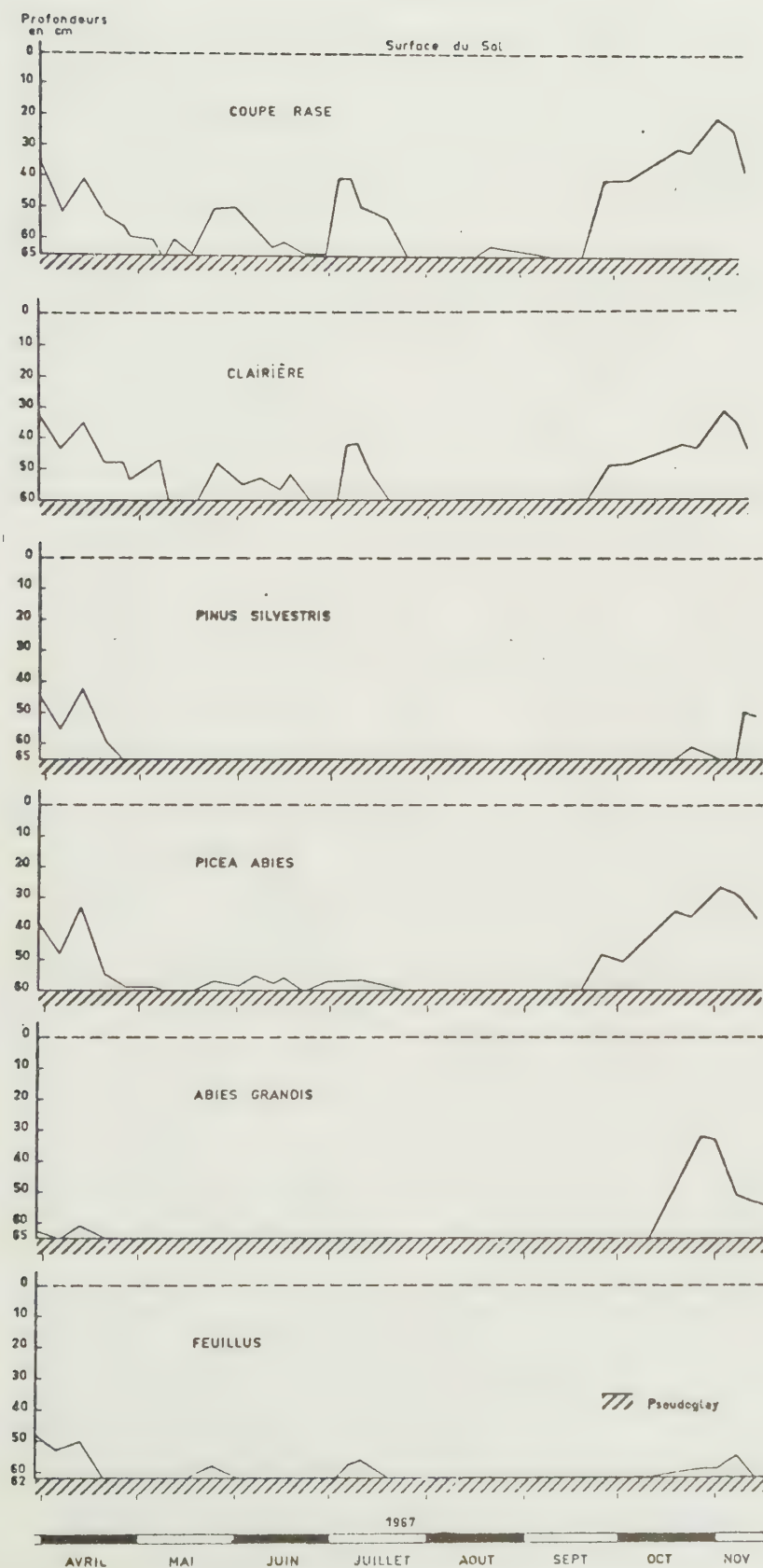


FIGURE 26
VARIATION DE LA
HAUTEUR MOYENNE
DES NAPPES
PERCHEES DANS
LES DIFFERENTS
MILIEUX ETUDIES.
(Forêt d'Amance)

- 1967 -

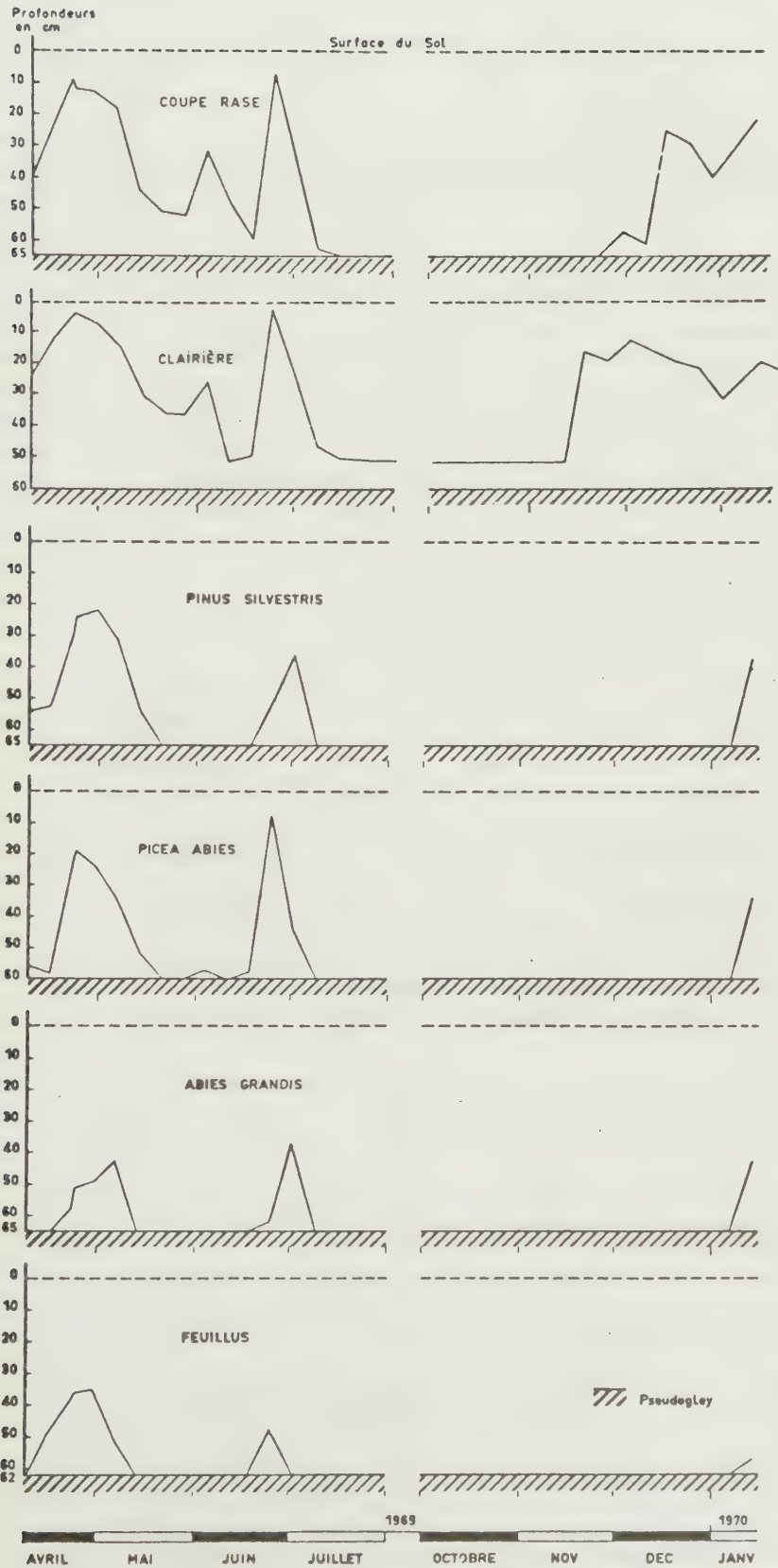
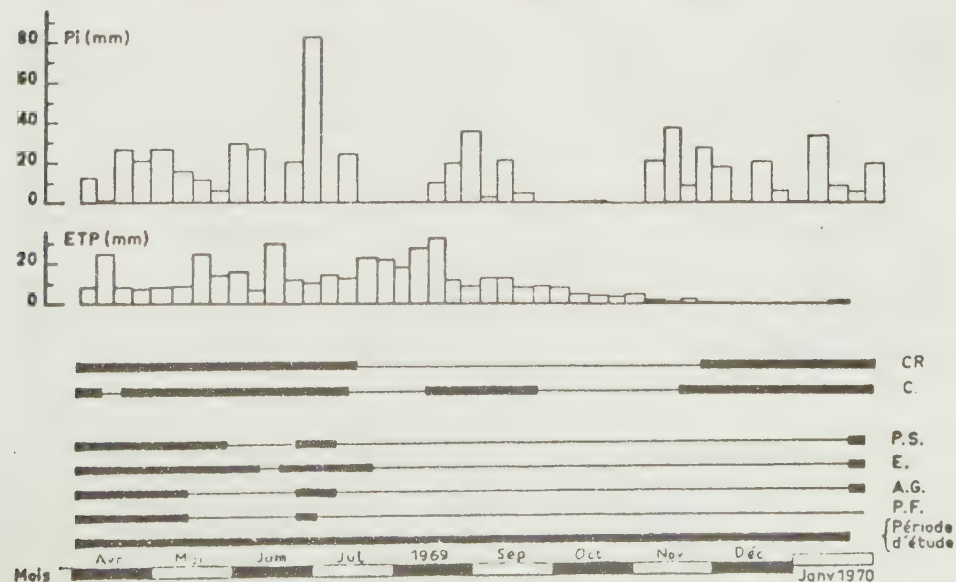
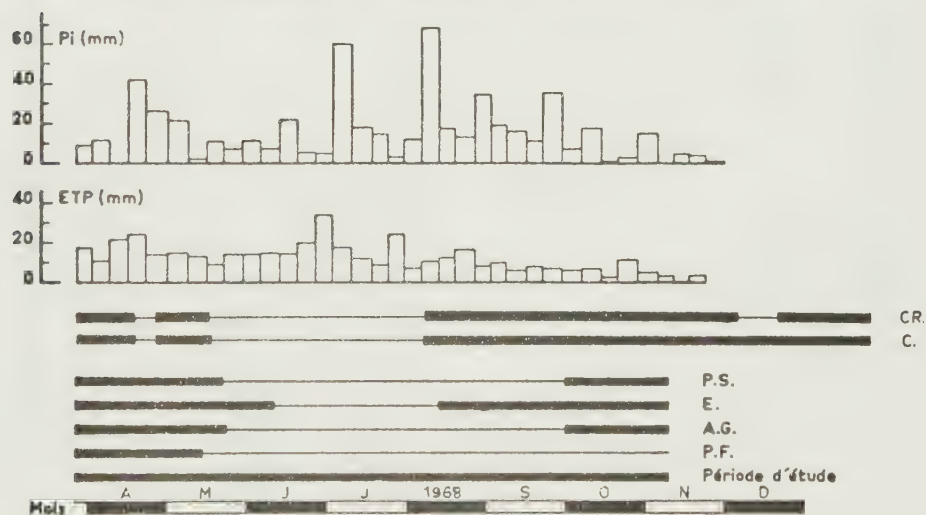
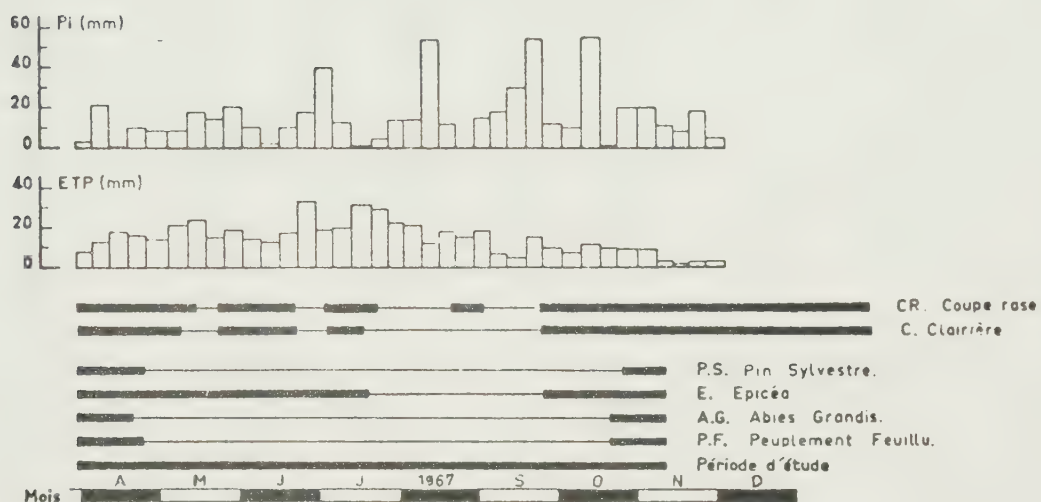


FIGURE 27
VARIATION DE LA
HAUTEUR MOYENNE
DES NAPPES
PERCHEES DANS
LES DIFFERENTS
MILIEUX ETUDIES.
(Forêt d'Amance)
- 1969 -

FIGURE 28

DISTRIBUTION DES PRECIPITATIONS INCIDENTES (P_i), DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP), DE LA PRESENCE — ET DE L'ABSENCE — DES NAPPES PERCHEES EN 1967, 1968 ET 1969.



TABEAU N° 16

DATES D'APPARITION ET DE DISPARITION DES NAPPES DANS LES PLACETTES ÉTUDIÉES

ANNEE	1967				1968				1969			
	Disparition	Apparition	Nbre jours sans nappes	Disparition	Apparition	Nbre jours sans nappes	Disparition	Apparition	Disparition	Apparition	Nbre jours sans nappes	Nbre jours sans nappes
Abies grandis	19 avril	20 octobre	184	21 mai	1er octobre	133	14 mai 9 juillet	25 juin 21 janvier 1970			42 196	238
Picea abies	18 juillet	26 septembre	70	11 juin	12 août	62	11 juin 23 juillet	18 juin 21 janvier 1970			7 182	189
Pinus sylvestris	25 avril	24 octobre	182	21 mai	1er octobre	133	21 mai 9 juillet	25 juin 21 janvier 1970			35 196	231
Peuplement feuillu	25 avril	20 octobre	178	14 mai	8 janvier 1969	239	14 mai 2 juillet	25 juin 21 janvier 1970			42 203	245
Coupe rase	8 mai 17 mai 23 juin 25 juillet 5 septembre	11 mai 24 mai 4 juillet 22 août 26 septembre	3 7 11 28 21	23 avril 21 mai 11 décembre	30 avril 12 août 26 décembre	7 83 15	16 juillet	26 novembre			133	
Clairière	8 mai 23 juin 18 juillet	24 mai 4 juillet 26 septembre	16 11 70	23 avril 21 mai	30 avril 12 août	7* 83	11 juin 23 juillet 20 août 24 septembre	18 juin 13 août 22 août 19 novembre			7 21 2 56	86

* Ce chiffre très faible est le résultat du maintien des nappes à un niveau très bas (presque disparues) du 21 mai au 12 août.
Il vaut mieux prendre en considération le chiffre de 90.

La coupe rase et la clairière se situent dans cette classification après les peuplements fermés. Ces résultats suggèrent que les niveaux d'évapotranspiration réelle pendant les périodes considérées, devraient s'ordonner dans cet ordre.

4 - Variation de l'humidité des sols et des placettes étudiées

L'état d'humidité des sols a été suivi à l'aide d'éléments de plâtre (Eléments Gely - Montpellier) qui permettent de mesurer le logarithme (pF) du potentiel de l'eau dans le sol. En fait, compte-tenu de la précision de ces appareils, il s'agit plutôt de mesure qualitatives que quantitatives, particulièrement pour les pF faibles ou élevés.

Ces éléments installés à 10, 30 et 60 cm de profondeurs ont permis, en parallèle avec l'étude des fluctuations des nappes, de préciser les périodes où les sols étaient à la capacité au champ et les périodes d'assèchement. A titre d'exemple, on peut voir la figure n° 29. L'utilisation des sondes n'a été possible que l'année qui a suivi leur installation. L'année suivante, de nombreuses irrégularités sont apparues et finalement, il n'a plus été possible d'utiliser valablement ces appareils.

A la lumière de cette expérience, il apparaît que ces sondes permettent seulement de déterminer si un sol est humide ou non. Il est illusoire de vouloir apprécier quantitativement des différences d'humidités.

5 - Evaluation de l'évapotranspiration réelle (E T R) des parcelles étudiées.

Le tableau n° 17 donne les valeurs mensuelles des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (1) au poste climatologique.

(1) Il s'agit de l'évapotranspiration potentielle générale dans la région de Champenoux. Nous définirons par la suite une évapotranspiration potentielle locale (microclimatique) dépendante de la structure du couvert forestier.

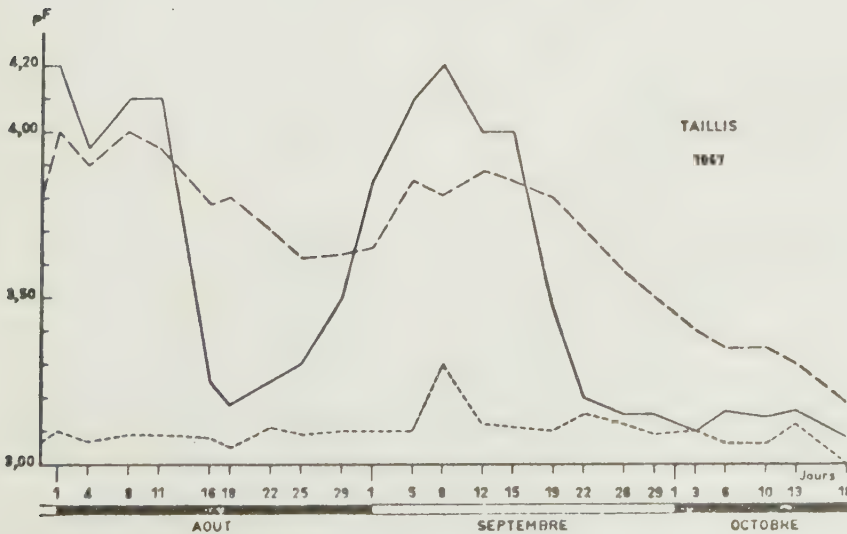
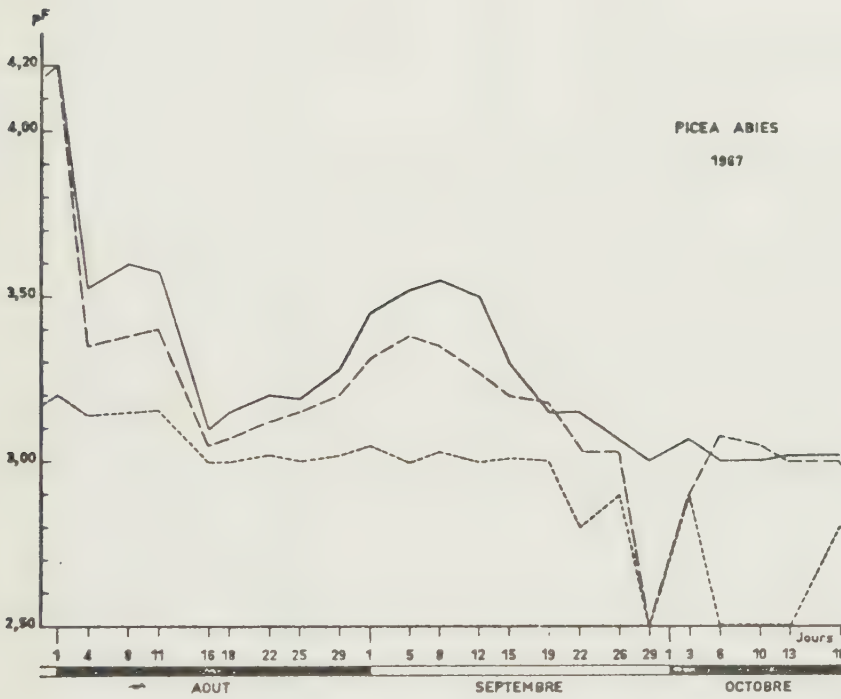
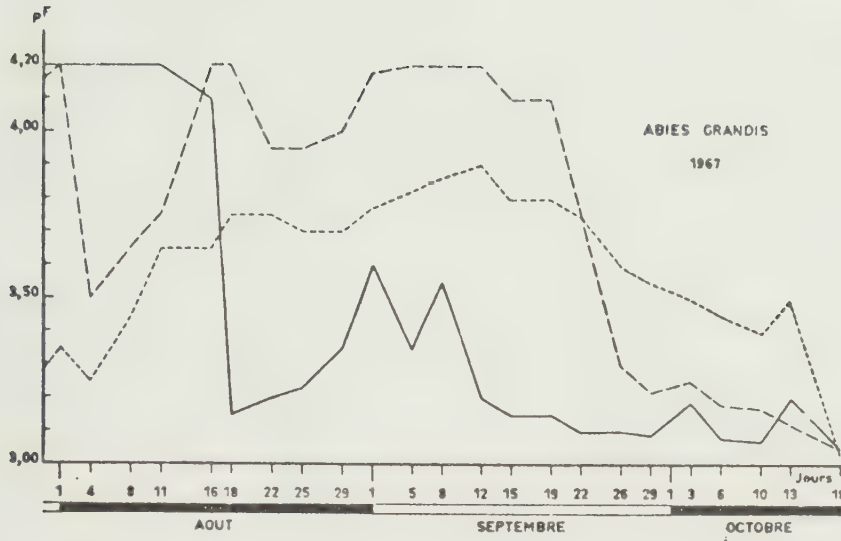


FIGURE 29
VARIATION DU
POTENTIEL
CAPILLAIRE (p^F)
A DIFFERENTES
PROFONDEURS
(10, 30 et 60cm)
PENDANT LES MOIS
D'AOUT, SEPTEMBRE
ET OCTOBRE 1967.

TABEAU N° 17

PRÉCIPITATIONS (mm) ET ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (mm) AU POSTE CLIMATOLOGIQUE D'AMANCE
POUR LES ANNÉES 1967 - 1968 - 1969

Année	1967		1968		1969	
	Mois	Précipitations	ETP	Précipitations	ETP	Précipitations
	Janvier	37,4	10,3	64,0	6,8	30,9
	Février	43,9	25,3	59,8	12,3	45,0
	Mars	49,2	51,1	41,5	46,5°	78,9
	Avril	36,5	62,5°	73,0	78,0°	76,0
	Mai	71,9	81,1°	56,6	56,1	73,1
	Juin	41,8	80,2°	46,2	77,1°	125,4
	Juillet	57,8	112,8°	99,3	78,5	25,0
	Août	91,5	71,2	129,2	51,6	67,1
	Septembre	123,4	44,1	96,1	36,7	30,9
	Octobre	89,3	40,5	33,5	28,4	3,4
	Novembre	61,3	16,3	24,9	10,9	95,7
	Décembre	51,5	7,5	54,1	4,2	47,5
	Total	755,5	603,1	778,2	487,1	698,9
						474,1

° mois où ETP est supérieure aux précipitations.

Les calculs de E T R ont été effectués en utilisant l'équation (13). Le tableau n° 18 donne pour les périodes considérées les valeurs de l'évapotranspiration potentielle (E T P) (1) et du rapport $\frac{E T R}{E T P}$.

On remarque facilement que l'évapotranspiration réelle de la clairière et de la coupe est très inférieure à celle des peuplements fermés. Parmi ces derniers, le peuplement des Picea abies évapotranspire le moins. Les rapports $\frac{E T R}{E T P}$ voisins de 1 pour les peuplements sont les plus faibles pour la clairière en coupe rase.

6 - Discussion de conclusion

Les résultats obtenus montrent qu'il existe des différences relativement importantes dans les évaluations de l'évapotranspiration réelle des placettes étudiées. En particulier, la clairière et la coupe rase se distinguent très nettement des peuplements fermés.

C'est d'ailleurs ce que suggérerait l'examen des figures rapportant les fluctuations des nappes perchées. Il y a lieu de se demander comment ces différences peuvent être expliquées.

.../

- (1) L'évapotranspiration potentielle a été évaluée à l'aide de la formule de BOUCHET (1964) $E T P = \alpha [1 + \lambda(\theta)] E_p$ avec $\alpha = 0,37$
 E_p = évaporation mesurée sous abri à l'évaporomètre de Piche.
 $1 + \lambda(\theta)$ coefficient de correction de l'évaporation sous abri.

$$\theta = \theta_m + \frac{\theta_M - \theta_m}{4}$$

θ_M température maxima }
 θ_m température minima } sous abri.

Les calculs ont été effectués à partir des données recueillies à un poste climatologique situé à 500 m des placettes d'étude.

Remarquons que cette formule ne permet pas d'apprécier très précisément ETP, mais qu'elle doit être considérée comme un index du pouvoir évaporant de l'air.

La formule de PENMAN (1948) $E_p = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\gamma + \Delta}$ ou E_a = évaporation si la surface évaporante était à la température de l'air.
 des valeurs supérieures ainsi en 1968 : juin 108,4 mm, juillet : 106,4 mm, août : 81,5 mm

TABLEAU N° 18

ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE DES PARCELLES ÉTUDIÉES (ETR), ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP)
PRÉCIPITATIONS INCIDENTES (Pi) EN mm, ET RAPPORT $\frac{ETR}{ETP}$ POUR LES PÉRIODES ÉTUDIÉES

Période	Pi mm	ETP mm	E . T . R . (mm)					coupe rase (5)	clairière (6)	ETR (1)	ETR (2)	ETR (3)	ETR (4)	ETR (5)	ETR (6)
			Abies grandis (1)	Picea abies (2)	Pinus sylvestris (3)	Peuplement feuillu (4)									
29 mars 1967															
au															
10 novembre 1967	532,6	502,1	497,5	465,8	516,5	515,9	393,5	406,1	0,99	0,93	1,03	1,02	0,78	0,80	
26 mars 1968															
au	548,7	410,0	524,9	428,7	472,8	536,8	351,1	353,5	1,28	1,04	1,15	1,30	0,85	0,82	
11 novembre 1968															
2 avril 1969															
au	586,8	437,0	556,0	509,0	525,9	560,2	373,1	402,1	1,27	1,16	1,20	1,28	0,83	0,90	
21 janvier 1970															

TABLEAU N° 19

COMPARAISON DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (1) DANS LA COUPE RASE
ET DANS LA CLAIRIÈRE

	1967			1968			1969		
	Coupe rase mm	Clairière mm	Clairière en % Coupe rase	Coupe rase mm	Clairière mm	Clairière en % Coupe rase	Coupe rase mm	Clairière mm	Clairière en % Coupe rase
Janvier	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Février	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mars	-	-	-	46,5	32,7	70,3	22,3	17,8	79,8
Avril	62,5	48,0	62,5	78,0	54,2	69,5	51,9	39,7	76,4
Mai	81,1	46,5	57,3	56,1	33,8	60,2	71,3	44,4	62,2
Juin	80,2	51,0	63,6	77,1	41,5	53,8	64,7	36,5	56,5
Juillet	112,8	68,2	60,4	78,5	40,3	51,3	83,5	53,3	63,8
Août	71,2	40,3	56,6	51,6	24,1	46,5	85,7	47,7	55,5
Sept.	44,1	21,0	47,6	36,7	16,1	43,8	45,3	22,0	48,5
Oct.	40,5	21,7	53,6	28,4	15,8	55,6	22,0	11,8	53,6
Nov.	16,3	9,0	55,2	10,9	7,7	70,6	8,7	8,1	93,0
Déc.	-	-	-	-	-	-	-	-	-

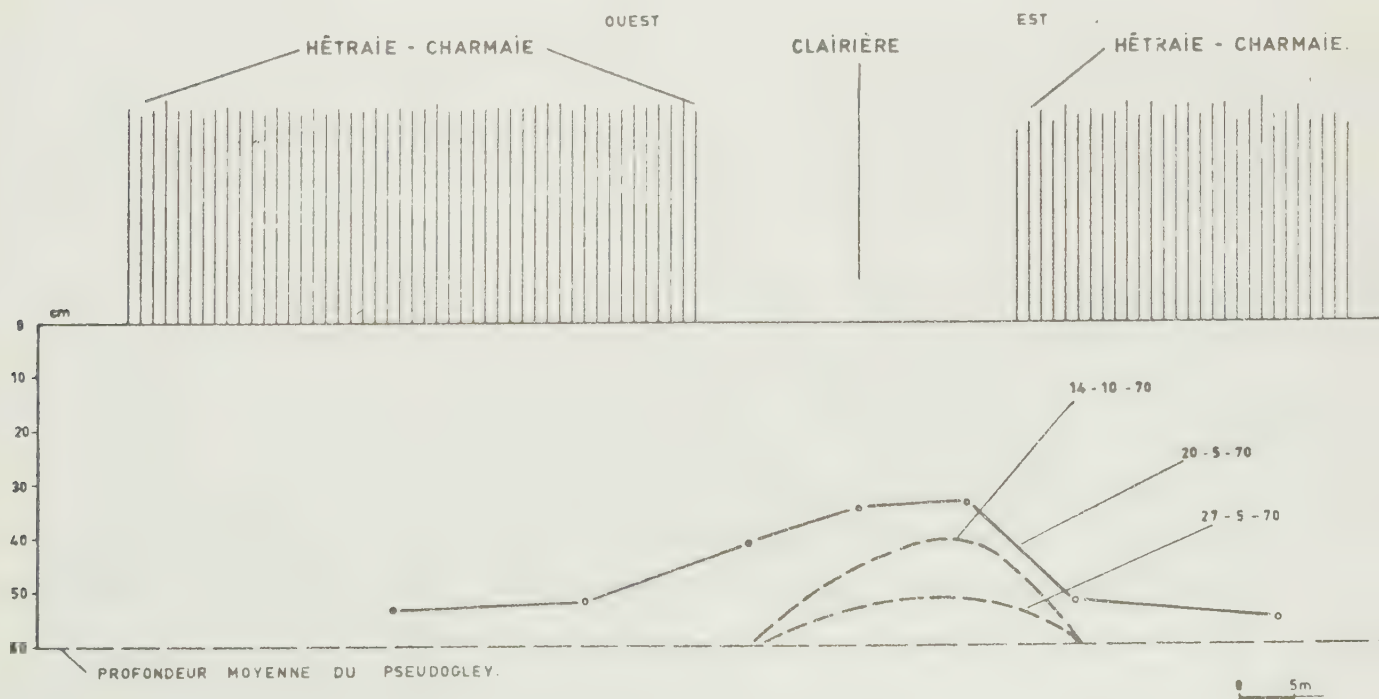
(1) E.T.P. calculé à partir de la formule du "Piche corrigé" de Bouchet (1964)

En ce qui concerne la clairière et la coupe rase, il faut remarquer que la végétation forestière ayant disparu, la recolonisation par les plantations et la végétation naturelle est lente. De ce fait, au moment des mesures 1967 à 1969, les potentialités évapotranspiratoires de la végétation dans ces stations sont faibles. Il faut pour ce qui concerne la clairière faire une remarque importante : la végétation naturelle et artificielle qui s'est développée après l'ouverture du couvert a une potentialité d'évapotranspiration moindre que le peuplement préalablement existant. Mais au niveau de cette clairière, l'évapotranspiration potentielle locale est plus faible qu'en plein découvert. Nous avons évalué ETP local à partir de la formule du "Piche corrigé" de BOUCHET (1964) (1). Le tableau n° 19 donne comparativement les valeurs relevées dans la clairière et dans le plein découvert pour les saisons de végétation 1967, 1968 et 1969. Les différences sont importantes. Ainsi en juillet en août 1967, l'ETP Piche corrigé clairière ne représente que 60 et 57 % de celle de la coupe rase, soit une diminution de 40 à 43 %. Cette diminution du pouvoir évaporant de l'air se retrouve aussi dans les bandes forestières, ainsi que l'on peut le voir sur les figures n° 6, 7 et 8. Il faut cependant remarquer, si l'on revient à la formule de PENMAN $E_p = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\gamma + \Delta}$, que le Piche traduit surtout l'affaiblissement du terme E_a . La corrélation ETP mesurée - ETP calculée au Piche corrigé a été établie pour une zone de plein découvert. Or ici, nous nous trouvons en terrain plus ou moins boisé. On peut finalement estimer (BOUCHET communication orale) que l'abaissement local de ETP est égal au 1/3 des valeurs trouvées ici soit une diminution de 15 %. De toute façon, cette diminution n'est pas négligeable. Il s'agit d'un aspect particulièrement intéressant car il fait apparaître un des caractères écologiques les plus importants de la clairière et des bandes forestières : un microclimat hydrique particulièrement favorable à la végétation en général et aux arbres en particulier. Ensuite, par suite d'une demande climatique (ETP locale) modérée, les végétaux se trouvent dans les meilleures conditions de croissance : les phénomènes de régulation stomatique

(1) Mesures effectuées à 1,50 m de hauteur.

sont moins fréquents et les processus de photosynthèse plus actifs et finalement plus productifs. Il en résulte alors une meilleure croissance. Nous verrons dans le deuxième chapitre les répercussions de ces caractéristiques microclimatiques sur la biologie des arbres et plus particulièrement des résineux. Dans la clairière l'évapotranspiration réelle de la végétation (jeunes résineux + végétation naturelle herbacée) est augmentée par le "pompage" qu'effectuent les arbres de la lisière du peuplement environnant. A ce sujet, il est intéressant de remarquer que la nappe perchée est plus haute au centre de la clairière que sur ses lisières comme le montre la figure n° 30. Il est possible d'ajouter qu'il y a une dissymétrie entre l'Ouest et l'Est. Dans cette dernière situation, la nappe est plus épaisse, ce qui semble en rapport direct avec une pluviométrie plus élevée.

FIGURE 30
PROFONDEUR DE LA NAPPE PERCHÉE, DANS LA CLAIRIÈRE, ET DANS
LE PEUPLEMENT FEUILLU ENVIRONNANT. Forêt d'Amance.



Cette figure montre également la différence de profondeur de la nappe perchée entre le peuplement feuillu et la clairière. Dans cette dernière station, la nappe constitue une véritable "lentille" au milieu du peuplement feuillu environnant. On peut ajouter que le drainage latéral n'est pas très important dans ce type de sol, car de telles hétérogénéités n'existeraient pas, ou du moins, s'estomperaient rapidement après les pluies.

Pour les peuplements fermés, des différences existent. En particulier, les Epicéas évapotranspirent notablement moins que les autres peuplements. C'est d'ailleurs ce que suggérerait l'examen des fluctuations des nappes perchées. Qu'elle est l'origine de ces différences ? Il faut dire en premier lieu que les Epicea sont les plus jeunes des peuplements en cause. Or, il semble établi maintenant (MOLCHANOV 1963), que l'évapotranspiration réelle des peuplements augmente avec l'âge jusqu'à un maximum qui varierait suivant l'espace et la station, mais qui, en première approximation, se situerait entre 60 et 80 ans. Cette évolution de l'évapotranspiration réelle est liée au développement du système racinaire et de l'appareil foliaire. Cette remarque s'applique aussi à l'évolution de l'évapotranspiration réelle d'une coupe rase. E T R augmentera à mesure que la végétation naturelle ou artificielle recolonisera l'ensemble du terrain et aura un indice foliaire plus élevé.

En ce qui concerne le peuplement feuillu, il faut noter qu'il est issu d'un taillis, donc que son système racinaire est plus vieux que lui (une révolution au moins) et que de ce fait, les possibilités "d'extraction" d'eau du sol sont sans doute supérieures à celles d'un peuplement de franc pied du même type et du même âge.

On peut se demander si, malgré la présence du pseudogley, les racines n'arrivent pas à s'enfoncer dans le sous-sol marneux et à s'alimenter ainsi en eau. C'est peu probable, comme nous l'ont montré les études de l'enracinement que nous avons effectuées sur plusieurs profils pédologiques. Quoi qu'il en soit, nous aurions alors une évaluation par défaut (l'écart avec la valeur réelle ne peut pas être considérable, compte-tenu du fait que nous sommes très proches de l'évapotranspiration potentielle).

On remarquera aussi que l'hétérogénéité de la couverture végétale intervient dans les phénomènes d'évapotranspiration et les apports latéraux d'énergie peuvent faire varier considérablement l'évapotranspiration potentielle d'un point à un autre. Les apports d'énergie par advection sont loin d'être négligeables dans le cas où les peuplements se trouvent à proximité d'une zone agricole (céréales par exemple) ou d'un terrain déboisé (coupe rase) qui présentent en été une évapotranspiration potentielle locale plus élevée que la forêt voisine.

En effet, BOUCHET (1963) a montré que E T P dépendait aussi de E T R. Les apports d'énergie se font évidemment de la zone qui évapore le moins vers celle qui évapore le plus. La captation de cette énergie advective sera d'autant plus importante que les peuplements auront une taille plus élevée. Le peuplement feuillu se trouve sous le vent de la coupe rase qui fonctionne en source "chaude". La consommation d'eau de ce peuplement peut donc dépasser grâce à l'énergie advection, l'équivalent en eau du rayonnement net. Le peuplement d'Abies grandis a une taille nettement plus élevée (23) que les autres et il est également possible que cela intervienne dans l'explication des différences constatées. Dans la formule (15), nous avons vu que l'évapotranspiration était d'autant plus importante que r_a est petit. Or, la résistance à la diffusion dans l'air (r_a) diminue avec la hauteur de la végétation (RUTTER 1968). Ainsi, la hauteur des peuplements peut intervenir pour augmenter le flux évapotranspiratoire.

L'interception représente un paramètre important susceptible d'expliquer une partie des différences observées. L'évapotranspiration totale, c'est-à-dire en fait, E T R peut s'écrire :

$$(19) \quad E T R \text{ totale} = E T R \text{ peuplement} + I_n$$

I_n , c'est-à-dire l'eau interceptée par le couvert, peut diminuer plus ou moins E T R du peuplement et par voie de conséquence influencer l'évapotranspiration réelle totale. Dans des recherches effectuées (AUSSENAC, 1972), sur des arbres isolés, en simulant les phénomènes d'interception par des pulvérisations d'eau, nous avons trouvé que 90 % de l'eau interceptée

était évaporée sans contrepartie pour les plants. Les plants traités ont transpiré 30 % de moins que les plants témoins. Mais, la consommation totale d'eau (transpiration + interception) a été finalement 3,2 fois plus grande. RUTTER (1964), THORUD (1967) ont fait état de résultats voisins. Il est probable cependant que, dans le cas de peuplement étendus et à couvert fermé, ces pourcentages de réduction de la transpiration sont différents.

Il est possible d'aborder le problème de façon théorique comme l'a fait par exemple RUTTER (1968) en partant des équations de BURGY et POMEROY (1968). Perte par interception = $(1 - E_T/E_{I_n}) I_n$ avec I_n hauteur d'eau interceptée, E_T taux d'évapotranspiration, E_{I_n} taux d'évaporation de l'eau interceptée, et de MONTEITH (1965) équation (15) et d'écrire alors que :

$$(20) \quad \text{Perte nette par interception} = \frac{\gamma_s^r I_n}{(\Delta + \gamma) r_a + \gamma r_s}$$

A partir de cette formule, il est visible que la perte par interception sera d'autant plus élevée et donc voisine de 1 que r_s sera grand devant r_a . Or, r_s varie selon les espèces et r_a diminue avec la hauteur des peuplements. Il est donc clair ici que la perte nette varie avec les essences et les peuplements et bien sûr ceci a une incidence sur le bilan évapotranspiratoire.

Les chiffres que nous avons obtenus à Nancy pour les peuplements sont voisins de ceux rapportés à divers auteurs. RUTTER (1964) en Angleterre pour un peuplement de Pinus silvestris L. trouve que le rapport $\frac{E_{TR}}{E_{TP}}$ est compris entre 0,98 et 1,20. FOURT et HINSON (1970) donne 1,00 à 1,47 pour Pinus nigra ssp laricio et 0,64 à 0,94 pour Pseudotsuga menziesii.

L'efficience de la transpiration (ASLYNG 1956) est une notion intéressante pour la compréhension du fonctionnement des formations végétales et plus particulièrement des peuplements forestiers. En toute

(1) E_{TP} calculé à partir de l'évaporation d'une nappe libre en bac.

rigueur, c'est la quantité d'eau consommée par unité de poids de matières sèches produites. Il ne nous était pas possible de disposer des données relatives à la production de matière sèche. Mais, nous avons pu calculer l'accroissement courant en m³/ha/an de bois fort (PARDE 1961). Il existe une relation étroite entre l'accroissement de biomasse et l'accroissement en volume bois fort et il était intéressant d'utiliser ce dernier pour avoir une valeur approchée du coefficient transpiratoire dans les quatre peuplements que nous avons étudiés. Le tableau n° 20 rapporte les calculs effectués. Nous pouvons remarquer que plus le rapport $\frac{E}{T R}$

Production m³/ha/an

(1)

est petit, meilleure est l'efficience transpiratoire. Le peuplement feuillu et les pins sylvestres ont une mauvaise efficience transpiratoire par comparaison avec les Epicéas et les Sapins de Vancouver. Ces résultats sont intéressants, car ils montrent que pour des consommations d'eau relativement voisines, il est possible d'avoir des productions (m³) de bois très différentes puisqu'elles varient de 1 à 4, feuillus : 7.8 m³/ha/an, Abies grandis: 30 m³/ha/an.

L'Epicéa se présente comme une espèce très efficace, il en est de même du Sapin de Vancouver, qui pouvait poser des problèmes. Il s'agit en effet d'une espèce introduite et l'on pouvait se demander si son introduction en peuplement ne risquait pas de perturber le cycle hydrologique. Ces conclusions ne sont valables en toute rigueur que pour des types de stations identiques aux nôtres.

D. INFLUENCE DE QUELQUES COMPOSANTES DU CYCLE HYDROLOGIQUE : REDISTRIBUTION AU SOL DES PRECIPITATIONS ET EVAPOTRANSPIRATIONS REELLES

Nous avons montré dans les paragraphes précédents comment la nature (espèce) et structure du couvert modifiait et influençait d'une part la distribution des précipitations au sol et d'autre part l'évapotranspiration réelle de ces couverts. Dans les paragraphes qui vont suivre, nous allons envisager les relations de ces phénomènes avec l'espèce et la structure des peuplements d'une part et la pédogénèse d'autre part.

(1) Il faut quand même ajouter qu'il serait intéressant de pouvoir calculer l'efficience transpiratoire réelle car la part du bois de tige dans la biomasse totale est plus importante chez les résineux que chez les feuillus.

TABLEAU N° 20

EFFICIENCE DE L'EAU DANS LES PEUPELEMENTS ÉTUDIÉS

ESSENCES	ABIES GRANDIS	PICEA ABIES	PINUS SYLVESTRIS	PEUPELEMENT FEUILLU
Consommation moyenne d'eau (mm)	526,1	467,8	505,0	537,6
Accroissement courant en m ³ / ha / an	30,0	25,2	11,2	7,8
Rapport ETR Accroissement courant en m ³ / ha / an	17,5	18,6	45,0	68,9

1 - Relations avec l'espèce et la structure des peuplements.

Nous avons mis en évidence "l'aptitude" plus ou moins grande de certaines espèces à permettre un important écoulement d'eau le long des troncs. Il était intéressant de se demander qu'elles pouvaient être les relations qui existaient entre ces quantités importantes d'eau qui arrivaient ainsi au pied des troncs et les différentes espèces. Il ne nous était pas possible d'entreprendre des recherches approfondies dans ce domaine, aussi avons nous essayé d'avancer à la fois par une recherche bibliographique et par une série d'expérimentations de terrain.

Sur le plan du rôle de l'écoulement le long des troncs, on pouvait imaginer que cette eau arrivant ainsi au sol jouait un rôle important pour l'alimentation hydrique de l'arbre. Les espèces ayant un fort écoulement devaient sans doute présenter un enracinement typique et différent des autres.

C'est précisément ce que nous avons pu constater en nous aidant de l'ouvrage de KÖSTLER et al (1968) qui présente une étude détaillée de l'enracinement des principales essences forestières. Les espèces à fort écoulement (Tilleul, Hêtre, Charme, Douglas) ont un racinement très important (ramifié et dense) autour et sous le tronc, alors que les autres espèces : Chêne, Pin Sylvestre, Epicéa, ont un enracinement beaucoup plus traçant et peu dense autour du tronc. Les photographies n° 5 (Annexe) extraites de l'ouvrage de KÖSTLER sont très démonstratives à cet égard. Ainsi, il est très probable que l'enracinement des différentes espèces est en corrélation avec la répartition de l'eau au sol ($P_s + P_t$) dans les peuplements.

En ce qui concerne les arbres qui constituent les peuplements, on doit se demander qu'elles peuvent être les conséquences de la redistribution des précipitations (P_s et P_t). Des études peu nombreuses à ce jour (STOUT 1956) sur le système racinaire et sa répartition spatiale, montrent qu'il y a des zones préférentielles de développement des racines : à savoir d'une part la zone correspondant à la projection de la bordure des couronnes et d'autre part, la périphérie des troncs. Il s'agit de régions bien

alimentées en eau, comme nous l'avons montré précédemment (*voir figure n° 22*). ESCHNER (1967) a fait des observations semblables. Alors, il est possible que cette distribution au sol soit une des composantes du phénomène de "compétition" entre individus, soit d'une même espèce ou d'espèces différentes.

Pour une même espèce, les individus mieux développés - diamètre du fût plus grand - présentent un écoulement plus grand et une interception plus élevée que les arbres de moins belle venue. Il en résulte donc une alimentation hydrique du sol différente. Si l'on considère deux arbres voisins, mais d'importance différentes, on notera schématiquement : en allant de l'arbre le plus gros vers le plus petit (*voir figure n° 22*)

- une zone bien alimentée en eau autour du tronc
- une zone "sèche" à la suite à cause des phénomènes d'interception
- une couronne humide à l'aplomb de la bordure des couronnes
- une zone "bèche" mais relativement plus humide que la zone correspondante de l'arbre voisin
- et enfin, une zone bien alimentée en eau autour du tronc du deuxième arbre.

Compte-tenu des remarques précédentes relatives aux régions préférentielles de développement des racines, il est possible d'imaginer une dynamique particulière du développement racinaire : le système racinaire de l'arbre le plus compétitif en l'occurrence le plus gros, envahit progressivement l'espace de l'arbre le moins compétitif. En effet, les racines du premier vont se développer vers les zones les plus "humides" qui sont précisément situées à proximité de l'arbre le plus petit (1). Il s'agit bien sûr d'un phénomène très progressif et donc très difficile à mettre en évidence expérimentalement (AUSSENAC, DECOURT, 1974).

(1) Une analyse voisine peut être faite en ce qui concerne deux arbres d'espèces différentes, un écoulement fort (Hêtre) et un écoulement faible (Chêne).

2 - Relation avec les phénomènes pédogénétiques

Les influences des composantes du bilan hydrologique sur la pédogénèse sont complexes et il n'est pas question dans ce travail, d'analyser l'ensemble de ces phénomènes. Nous voudrions simplement mettre en évidence deux grands types d'influences que nous avons pu aborder dans nos travaux :

- le pluviolessivage
- la remontée des nappes perchées

. le pluviolessivage

Dans les peuplements forestiers, les précipitations qui arrivent au sol (P_s et P_t) se chargent au contact des feuilles, des branches et des troncs d'éléments minéraux et organiques. A l'occasion des études sur la redistribution des précipitations sous le couvert, nous avons pu approcher de phénomène du pluviolessivage. L'étude a été réalisée dans le peuplement d'Epicea situé en Forêt d'Amance (*tableau n° 1*) (Aussenac, Bonneau, Le Tacon, 1972). Le tableau n° 21 donne le bilan des éléments minéraux retournant au sol par l'intermédiaire des précipitations arrivant directement (P_s) et par les précipitations s'écoulant le long des troncs (P_t).

Les eaux de pluie apportent directement une certaine quantité d'éléments minéraux. On doit bien entendu les déduire du total arrivant au sol pour connaître l'apport du pluviolessivage des surfaces végétales.

Les apports directs par la pluie sont importants : 20 à 30 kg/ha/an d'azote, 5 à 10 kg/ha/an de potassium, 2 à 3 kg/ha/an de magnésium et 0,04 kg/ha/an de phosphore.

TABLEAU N° 21

BILAN DES ELEMENTS MINIRAUX RETOURNANT AU SOL DANS UN
PEUPELEMENT DE PICEA ABIES (EN KG PAR HECTARE ET PAR AN)

	Pluvio-lessivage apparent		Filtration		Total des éléments arrivant au sol	Apport direct par la pluie (approché)	Pluvio- lessivage réel (approché)	Retour annuel (approché) des éléments prélevés dans le sol
	Retour par la litière (1)	Filtration à travers le feuillage (2)	Ecoulement le long des troncs (3)	+ Ecoulement (4)	5 (1)+(4)	(6)	(7) (4)-(6)	(8) (1) + (7)
Azote nitrique		7,27	0,22	7,49				
Azote organique et ammoniacal		18,48	1,20	19,68				
Azote total	30,77	25,75	1,42	27,17	57,94	20 à 30	0 à 7	30 à 37
P ₂ O ₅	5,31	0,39	0,04	0,63	5,94	0,1	0,62	6
K	9,24	21,37	2,12	23,49	32,73	5 à 10	13 à 18	22 à 27
Ca	42,63	12,25	1,21	13,46	56,09			
Mg	3,00	3,04	0,27	3,31	6,31	2 à 3	0 à 1	3 à 4

La composition des eaux de pluviollessivage du couvert, déduction faite de l'apport direct des pluies, montre que le feuillage de l'épicéa cède très peu de Mg et de P (0 à 1 kg/ha/an) peu d'azote (0 à 7 kg/ha/an), mais beaucoup de K (13 à 18 kg). (Aussenac 1969. Aussenac, et al 1972).

Dans le cas de l'Epicea, l'écoulement le long des troncs est peu important et apporte des quantités relativement faibles d'éléments. Il est probable qu'il n'en est pas de même chez les espèces à écoulement fort comme le Hêtre par exemple.

. la remontée des nappes perchées.

Nous avons montré qu'en rapport avec la couverture du sol et le pouvoir évaporant de l'air (E T P), l'évapotranspiration réelle était plus ou moins importante. Il pouvait alors en résulter dans la coupe rase et la clairière une remontée et une plus grande durée des nappes perchées temporaires. Ces phénomènes sont déterminants pour la végétation et pour l'évolution des sols.

Ainsi, l'occupation et la structure du couvert ont une répercussion considérable sur le régime hydrique du sol et par voie de conséquence, sur son occupation par la végétation. Ces résultats sont extrêmement importants dans la mesure où ils permettent de mettre en évidence le rôle des opérations sylvicoles dans les phénomènes de dégradation des sols. Les résultats de nos travaux ont ainsi permis à BECKER (1971), d'expliquer en forêt de Charmes (Vosges) les corrélations existant entre la végétation naturelle et les différents types de sol. Sur un même type de sol à l'origine, la surexploitation plus ou moins importante de la forêt s'est traduite dans le cas extrême par la création de multiples clairières. La remontée consécutive des nappes a favorisé le développement d'espèces sociales à humus particulièrement défavorable. Il s'en suit alors une évolution des sols : dégradation de la structure avec tassement des horizons superficiels, entraînement du fer, décoloration des horizons A₂, création d'un horizon B₁.

3 - Conclusion

Dans ce court paragraphe, nous avons voulu simplement montrer combien la connaissance des influences du couvert forestier sur l'eau était importante pour la compréhension des mécanismes du fonctionnement de la forêt.

La connaissance des composantes P_s et P_t par lesquelles s'effectue le pluviollessivage est nécessaire à l'analyse des influences des différentes espèces sur l'évolution des sols. Des différences de structure (clairières, trouées, éclaircies) et les variations d'interception et d'évapotranspiration qu'elles entraînent peuvent avoir des grandes conséquences sur l'évolution des sols et donc finalement sur l'ensemble du peuplement. On voit alors comment les facteurs microclimatiques peuvent intervenir dans des processus où on ne soupçonnait pas leur influence.

L'interaction forêt  climat évolue dans l'espace et dans le temps ; cette caractéristique essentielle ne doit pas être oubliée dans l'analyse des rapports du climat et de la forêt.

Ainsi que nous venons de le voir, les facteurs microclimatiques interviennent indirectement dans la vie des peuplements forestiers par l'intermédiaire de la pédogénèse et de la concurrence entre arbre et entre espèce. Ils interviennent aussi directement sur l'écophysiologie des arbres : effet sur la morphologie et l'anatomie de l'appareil foliaire, sur la photosynthèse, la transpiration et finalement sur la croissance. Dans la deuxième partie de notre travail, nous étudierons comment les caractéristiques particulières de la coupe rase, la clairière et la coupe d'abri se traduisent sur la biologie des jeunes résineux.

DEUXIÈME PARTIE :

ETUDE DE L'INFLUENCE DES FACTEURS MICROCLIMATIQUES SUR LE DÉVELOPPEMENT ET LA CROISSANCE DE QUELQUES JEUNES RÉSINEUX.

I. INTRODUCTION

Dans la première partie de ce travail, nous avons voulu montrer combien la structure du couvert forestier pouvait modifier et influencer les facteurs du climat au point de créer véritablement des microclimats forestiers. Ces modifications microclimatiques ne sont pas sans conséquences pour la vie de la forêt et particulièrement pour les jeunes arbres qui doivent assurer la régénération des peuplements.

Les facteurs climatiques ou microclimatiques peuvent avoir schématiquement deux-modes d'action (Aussenac 1973) :

- une action accidentelle qui peut être due à la température, au vent, à la neige ou brouillard givrant ,
- une action permanente qui est le fait du rayonnement, de la température, du vent, de l'eau.

Le premier mode d'action correspond à des accidents climatiques qui peuvent provoquer la mort d'une partie (bourgeons, rameaux, branches, fleurs) ou de la totalité de l'arbre. Ce type d'action peut être très important pour la limitation de la croissance.

L'action qualifiée de permanente est physiologique. Elle correspond à l'interaction des facteurs climatiques du génotype de l'espèce, particulièrement déterminante au niveau des processus photosynthétiques.

Les accidents climatiques peuvent avoir pourtant des prolongements physiologiques difficiles à cerner. Ainsi une gelée tardive peut avoir pour conséquence directe la destruction des bourgeons d'un jeune sapin, mais elle a une action indirecte en perturbant la physiologie de l'arbre (perte momentanée de la dominance apicale, ralentissement des phénomènes photosynthétiques par diminution de l'appareil foliaire et de son efficacité) pendant un nombre d'années plus ou moins grand.

Dans cette deuxième partie, nous étudierons la réponse des arbres et plus particulièrement de quelques résineux, aux facteurs microclimatiques.

L'étude a été menée en forêt domaniale d'Amance près de Nancy parcelle 58/59, le dispositif expérimental était composé de 3 traitements correspondants à 3 milieux bien définis et bien typés : une coupe d'abri, une coupe rase, et une clairière (1). Il en a déjà été question dans la première partie. Ils se situent en terrain non accidenté sensiblement plat, à une altitude de 230 m et sont suffisamment proches pour pouvoir être considérés comme étant placés dans des conditions climatiques générales identiques. Ces trois traitements sont installés sur les sols bruns lessivés marmorisés (horizon d'engagement à une profondeur de 60 cm) qui se sont développés sur des marnes liasiques recouvertes de limons. Les analyses chimiques et physiques (2) montrent que les sols de ces trois traitements peuvent être considérés comme identiques (tableau n° 22). Ces trois situations écologiques se différencient alors essentiellement par les conditions microclimatiques. Elles ont été étudiées de façon détaillée et les résultats ont été présentés dans la première partie de ce travail.

(1) Rappelons que, au départ, il s'agissait d'un taillis sous futaie dont les grosses réserves ont été exploitées en 1947. Le taillis avait été recepé en 1943. On se trouve donc en présence d'un peuplement feuillu pour partie sur souches (âgé de 30 ans en 1973 et haut de quelques 13 mètres en moyenne).

La coupe d'abri a conservé 1300 tiges/hectare . La clairière a un diamètre de 26 mètres et le rapport $\frac{\text{Diamètre}}{\text{Hauteur du peuplement}}$ est égal à 2.

(2) Nous remercions ici Monsieur BONNEAU, Directeur de la Station des Sols du C.N.R.F. qui a bien voulu effectuer les analyses et les interpréter.

Après avoir réalisé ces dispositifs expérimentaux, à partir du même peuplement feuillu, nous avons installé par plantation, 6 espèces ou provenances de résineux (1). Le tableau n° 23 en donne les caractéristiques. L'expérimentation s'est poursuivie de 1967 à 1973.

TABLEAU N° 22

ANALYSES DES SOLS DE LA COUPE D'ABRI, LA CLAIRIÈRE ET LA COUPE RASE

Traitement	Profondeur (cm)	Analyse chimique											Analyse granulométrique				
		Mat. org. %	C %	N %	C/N	pH	Ca (1)	K (1)	Mg (1)	T (1)	P ₂ O ₅ %	Fer libre %	Argile %	Limons fins %	Limons gros %	Sables fins %	Sables gros %
Coupe d'abri	10 (A ₁ g)	3,62	2,11	0,157	13,43	5,07	2,90	0,30	0,72	12,00	0,170	1,47	21,50	41,75	24,55	2,85	1,90
	30 (A ₂ g)	1,37	0,80	0,065	12,30	4,85	1,95	0,16	0,98	11,0	0,240	1,83	25,00	40,00	24,25	2,90	2,25
	60 (B ₁ g)	0,75	0,44	0,045	9,77	4,95	4,95	0,25	2,92	17,2	0,365	2,65	34,25	33,75	19,90	3,45	2,45
Clairière	10 (A ₁ g)	3,40	1,98	0,151	13,11	4,90	3,70	0,52	0,89	11,5	0,190	1,52	20,25	41,50	25,45	3,20	2,30
	30 (A ₂ g)	1,92	1,12	0,085	13,17	4,80	2,20	0,34	0,83	10,4	0,180	1,55	21,50	43,00	26,05	3,45	2,45
	60 (B ₁ g)	0,79	0,46	0,050	9,20	4,85	4,30	0,29	2,52	14,6	0,360	2,58	31,25	35,75	21,30	3,70	2,75
Coupe rase	10 (A ₁ g)	3,76	2,19	0,132	16,59	5,30	5,15	0,33	1,11	12,0	0,245	1,65	21,75	40,50	23,20	3,25	4,15
	30 (A ₂ g)	1,51	0,88	0,067	13,13	5,25	2,90	0,19	1,15	9,5	0,230	1,70	21,75	41,75	23,85	3,25	3,50
	60 (B ₁ g)	0,53	0,31	0,040	7,75	5,15	5,65	0,33	3,21	16,9	0,425	2,79	35,50	33,25	21,70	3,35	1,85

(1) en milliéquivalent pour 100 g.

(1) Les plants nous ont été fournis par la Station d'Amélioration des arbres forestiers du C.N.R.F.

II. LE DEBOURREMENT.

L'évolution des bourgeons depuis l'état de repos végétatif jusqu'au débourrement constitue une phase particulièrement importante du développement des arbres. Dans notre cas, il s'agit essentiellement d'un phénomène qui se manifeste au printemps. L'entrée en dormance des bourgeons s'effectue, en général pour les espèces étudiées ici, fin Juillet début Août. Dans quelques cas (Picea abies, Pseudotsuga menziesii) une deuxième poussée de croissance peut exister dans le courant de l'été (Août).

Le débourrement est sous la dépendance d'abord des facteurs internes (caractères génétiques), mais il est aussi conditionné (CHAMPAGNAT 1969) par des facteurs écologiques et particulièrement par des facteurs climatiques : température, photopériode, état de siccité du sol.

Au niveau écophysiological, il est intéressant de savoir si les conditions microclimatiques peuvent influencer ces phénomènes de débourrement.

A. LES METHODES D'ETUDE

Notre étude a porté sur les 6 espèces ou provenances de résineux (voir tableau n° 23) dans 3 situations écologiques différentes : la coupe rase, la coupe d'abri et la clairière. Nos observations se sont limitées au bourgeon terminal de la flèche. On sait en effet que chez les résineux : Abies alba, Picea abies et Pseudotsuga menziesii, la flèche provient du développement du bourgeon terminal qui, de ce fait, a un rôle déterminant dans la formation de l'arbre.

Au cours du printemps, les bourgeons passent par différents stades d'évolution. Dans notre étude, nous avons adopté l'échelle conventionnelle suivante (DEBAZAC 1965, AUSSÉNAC 1967) :

- 0 (b 0) : bourgeon non gonflé ayant conservé ses dimensions hivernales.
- 1 (b 1) : bourgeon gonflé présentant des écailles plus ou moins écartées.

TABLEAU N° 23

CARACTÉRISTIQUES DES ESPÈCES ÉTUDIÉES

ESPECE	PROVENANCE	Age * (ans)	NOMBRE* DE PLANTS A LA PLANTATION	HAUTEUR TOTALE MOYENNE FIN 1966 (mm)
<u>Abies alba</u> Mill.	Ecouvres II Lat 48°31' Long. 0°04' E Orne (France) Altitude 300 m	4	- 74 Coupe d'abri - 63 Clairière - 59 Coupe rase	135,5 147,3 168,0
<u>Abies alba</u> Mill.	Nébias Lat 42°54 N Long 2° 08' E Aude (France) Altitude 600 m	4	- 66 Coupe d'abri - 69 Clairière - 72 Coupe rase	148,6 160,0 175,3
<u>Abies alba</u> Mill.	Canigou I Lat 42°33' Long. 2°27' E Pyrénées orientales (France) Altitude 1800 m	4	- 29 Coupe d'abri - 32 Clairière - 29 Coupe rase	223,4 222,8 207,7
<u>Abies nordmanniana</u> Spac	Gerbéville Lat. 48°30' Long 6°30' E Meurthe et Moselle (France) Altitude 300 m	4	- 44 Coupe d'abri - 44 Clairière - 55 Coupe rase	123,6 143,3 145,9
<u>Picea abies</u> L.	La Joux Lat. 46°51' Long 6°03' E Jura (France) Altitude 800 m	4	- 63 Coupe d'abri - 58 Clairière - 57 Coupe rase	248,0 240,2 263,6
<u>Pseudotsuga</u> <u>menziesii</u> Mirb.	Farges II Lat. 45°32' Long. 2° 11' E Corrèze (France) Altitude 700 m	4	- 64 Coupe d'abri - 60 Clairière - 53 Coupe rase	229,1 228,7 227,5

* au printemps 1967

- 2 (b 2) : bourgeon laissant plus ou moins apparaître par transparence la jeune pousse sans que pour autant l'enveloppe protectrice soit éclatée.
- 3 (b 3) : bourgeon éclaté, les aiguilles de la pousse sont alors partiellement libérées. Le débourrement est effectif.
- 4 (b 4) : jeune pousse entièrement libérée et en phase de croissance.

Pendant toute cette phase d'évolution des bourgeons, les observations et les notations ont été effectuées deux fois par semaine.

B. RESULTATS

1 - Evolution des différents stades phénologiques du débourrement

Pour les années 1967, 1968, 1969, 1970 et 1971, le tableau n° 24 donne, pour les 6 espèces étudiées dans les 3 milieux : coupe rase, clairière, coupe d'abri, la date moyenne du stade b 3 considéré comme stade de débourrement. D'une façon générale, on remarque le groupe des 3 provenances de sapins pectinés qui sont plus précoces que les 3 autres espèces étudiées. Picea abies et Abies nordmanniana sont les plus tardifs. Pseudotsuga menziesii occupe une position intermédiaire entre ces deux groupes.

L'influence des conditions microclimatiques se manifeste sur la date de débourrement. Ainsi, par rapport à la situation de plein découvert (coupe rase), prise comme référence, les arbres installés dans la coupe d'abri et la clairière débourrent plus précocement. Les écarts moyens à la coupe rase sont les suivants (1).

	<u>A. alba</u>	<u>A. alba</u>	<u>A. alba</u>	<u>A. Nordmanniana</u>	<u>P. abies</u>	<u>Pseudotsuga</u>
	Ecouve	Nebias	Canigou			<u>menziesii</u>
Coupe d'abri :	- 8 jours	- 8 jours	- 8 jours	- 1 jour	- 2 jours	- 4 jours
Clairière:	- 7 jours	- 6 jours	- 6 jours	- 0 jour	- 3 jours	- 6 jours

(1) Les écarts ne sont pas significatifs dans le cas de Abies nordmanniana et Picea abies

TABLEAU N° 24

DATES DE DÉBOURREMENT (STADE b 3)

Situation	ANNEE		1967	1968	1969	1970	1971	1972	Moyenne 1967-1972
	ESPECE								
Coupe d'abri	Abies alba Ecouvès		12 Mai	29 Avril	5 Mai	14 Mai	30 Avril	6 Mai	6 Mai
	Abies alba Nebias		10 Mai	29 Avril	5 Mai	14 Mai	30 Avril	4 Mai	5 Mai
	Abies alba Canigou		11 Mai	5 Mai	7 Mai	15 Mai	1er Mai	6 Mai	7 Mai
	Abies nordmanniana		21 Mai	17 Mai	19 Mai	30 Mai	15 Mai	26 Mai	21 Mai
	Picea abies		14 Mai	15 Mai	21 Mai	5 Juin	17 Mai	27 Mai	21 Mai
	Pseudotsuga menziesii		13 Mai	7 Mai	11 Mai	21 Mai	10 Mai	16 Mai	12 Mai
Clairière	Abies alba Ecouvès		9 Mai	1er Mai	7 Mai	15 Mai	3 Mai	8 Mai	7 Mai
	Abies alba Nebias		9 Mai	1er Mai	7 Mai	17 Mai	2 Mai	8 Mai	7 Mai
	Abies alba Canigou		9 Mai	6 Mai	7 Mai	18 Mai	6 Mai	9 Mai	9 Mai
	Abies nordmanniana		20 Mai	17 Mai	19 Mai	28 Mai	16 Mai	21 Mai	20 Mai
	Picea abies		19 Mai	15 Mai	19 Mai	2 Juin	13 Mai	26 Mai	20 Mai
	Pseudotsuga menziesii		12 Mai	5 Mai	11 Mai	19 Mai	6 Mai	12 Mai	10 Mai
Coupe rase	Abies alba Ecouvès		10 Mai	10 Mai	10 Mai	24 Mai	9 Mai	19 Mai	14 Mai
	Abies alba Nebias		9 Mai	13 Mai	9 Mai	23 Mai	8 Mai	16 Mai	13 Mai
	Abies alba Canigou		12 Mai	16 Mai	13 Mai	24 Mai	10 Mai	19 Mai	15 Mai
	Abies nordmanniana		21 Mai	16 Mai	17 Mai	1 Juin	16 Mai	23 Mai	20 Mai
	Picea abies		20 Mai	21 Mai	21 Mai	5 Juin	16 Mai	25 Mai	23 Mai
	Pseudotsuga menziesii		13 Mai	15 Mai	16 Mai	24 Mai	10 Mai	18 Mai	16 Mai

D'une façon générale, les sapins pectinés ont donc un débourrement plus tardif dans la coupe rase que dans les 2 autres situations. Chez Abies nordmanniana et Picea abies, les écarts sont nuls ou très réduits. Par contre, chez Pseudotsuga menziesii, les écarts sont plus importants et se rapprochent des écarts observés chez les sapins pectinés. Nous verrons dans le paragraphe suivant, quelle explication peut-on donner à ces phénomènes ?

Le passage du stade b 2 au stade b 4 représente la phase critique du débourrement. L'étude des écarts (en jours) entre b 2 et b 4 montre que d'une façon générale (*tableau n° 25*) le débourrement dure plus longtemps dans la coupe d'abri et dans la clairière que dans la coupe rase. On obtient en moyenne les écarts suivants :

	<u>A. alba</u> Ecouvès	<u>A. alba</u> Nebias	<u>A. alba</u> Canigou	<u>A. nordmanniana</u>	<u>P. abies</u>	<u>Pseudotsuga</u> <u>menziesii</u>
Coupe d'abri	19	20	17	19	17	16
Clairière	18	18	18	17	13	14
Coupe rase	13	14	15	13	14	12

Dans la coupe rase, une fois le stade b 2 atteint, le phénomène de débourrement est plus rapide que dans les autres situations. Ceci résulte du fait que dans la coupe rase, le stade b 2 se situe le plus tard et qu'à ce moment là de l'année, il fait plus chaud. Or d'une façon générale, on remarque en effet que l'écart b2-b4 est d'autant plus grand que le stade b 2 est plus précoce.

2 - Relation du débourrement avec la température.

La température a une action importante sur l'évolution des plantes et l'élévation de température au printemps est un des facteurs déterminants du débourrement et de la croissance des arbres. A la suite de REAUMUR (1735) qui a proposé la notion de "sommes de températures", plusieurs chercheurs ont utilisé ces sommes pour caractériser les différents états de développement et de croissance d'une plante.

TABEAU N° 25

ÉCART (EN JOURS) ENTRE LES STADES b 2 ET b 4

Situation	Espèces	Années									
		1967	1968	1969	1970	1971	1972	Moyenne			
Coupe d'abri	<u>Abies alba Ecouves</u>	19	21	17	14	21	21	19			
	<u>Abies alba Nebias</u>	17	22	29	16	19	18	20			
	<u>Abies alba Canigou</u>	19	22	16	13	20	14	17			
	<u>Abies nordmanniana</u>	17	27	18	16	15	19	19			
	<u>Picea abies</u>	23	24	10	12	14	19	17			
	<u>Pseudotsuga menziesii</u>	11	21	11	14	16	20	16			
Clairière	<u>Abies alba Ecouves</u>	16	20	15	16	18	21	18			
	<u>Abies alba Nebias</u>	16	20	17	17	18	21	18			
	<u>Abies alba Canigou</u>	16	21	16	16	18	22	18			
	<u>Abies nordmanniana</u>	17	21	15	16	15	18	17			
	<u>Picea abies</u>	15	15	9	7	13	18	13			
	<u>Pseudotsuga menziesii</u>	10	14	11	11	18	18	14			
Coupe rase	<u>Abies alba Ecouves</u>	13	-	12	12	13	17	13			
	<u>Abies alba Nebias</u>	13	-	15	13	14	17	14			
	<u>Abies alba Canigou</u>	17	-	14	14	12	18	15			
	<u>Abies nordmanniana</u>	19	-	12	11	9	12	13			
	<u>Picea abies</u>	15	-	10	16	13	19	14			
	<u>Pseudotsuga menziesii</u>	11	-	7	9	17	17	12			

L'hypothèse la plus ancienne est d'admettre une relation linéaire entre température et croissance. On admet aussi aujourd'hui que la vitesse de croissance est liée à la température selon une loi exponentielle et on écrit :

$$Q = (Q_{10})^{\frac{t - t_0}{10}} \text{ avec } Q = 1 \text{ pour } t = t_0.$$

La valeur du Q_{10} représente le coefficient par lequel est multiplié la vitesse de croissance pour une augmentation de température de 10°C .

La méthode des sommes de Q_{10} est surtout valable quand les températures moyennes ne sont pas élevées. Les sommes de température par contre, sont préférables en été (DURAND, 1967).

Dans ce travail pour l'étude du débourrement, nous avons alors utilisé les sommes de Q_{10} et en l'absence de données précises pour les arbres forestiers nous avons retenu pour le Q_{10} la valeur de 3 (1). Les calculs ont été effectués à partir des températures moyennes de l'air sous abri à 1,50 m de hauteur, mesurées dans chacun des 3 milieux étudiés.

Dans le but de mettre en évidence une date initiale de sommation, les sommes de Q_{10} ont été effectuées de façon régressive en partant de la date de débourrement (stade b 3) jusqu'au 15 décembre de l'année précédente. Malheureusement, il ne nous a pas été possible de déterminer cette date précisément. Aussi, avons nous retenu comme date initiale de sommation le 1er janvier. Le tableau n° 26 donne alors les sommes de Q_{10} que nous avons obtenu du 1er janvier à la date de débourrement.

D'une façon générale, les sommes de Q_{10} sont plus élevées dans la coupe rase que dans les deux autres situations. Ces deux derniers milieux donnent d'ailleurs des chiffres très voisins. Nous observons aussi des variations d'une année à l'autre. Si l'hypothèse de l'action de la température est vraie, nous aurions du trouver des valeurs très voisines. Les différences peuvent s'expliquer en remarquant d'une part que nous avons utilisé ici un Q_{10} de 3, ce qui n'est pas

(1) Nous avons adopté à partir des travaux de BIDABE (1967) sur les arbres fruitiers.

TABLEAU N° 26

VARIATION DES SOMMES DE Q 10 DU 1^{ER} JANVIER À LA DATE DU DÉBOURREMENT
(STADE b 3)

Situation	Espèces	Abies alba Ecouves	Picea abies	Pseudotsuga menziesii
	Année			
Coupe d'abri	1968	544	666	589
	1969	476	645	526
	1970	487	693	543
	1971	501	678	562
	Moyenne	502	670	555
Clairière	1968	560	657	607
	1969	497	633	523
	1970	504	683	550
	1971	543	682	583
	Moyenne	526	664	566
Coupe rase	1968	636	716	674
	1969	525	665	625
	1970	605	736	605
	1971	597	711	613
	Moyenne	591	707	629

forcément juste (1) et que d'autre part, à la place de la température de l'air, il aurait été sans doute préférable de prendre la température réelle du bourgeon. Malheureusement, il ne nous était pas possible de mesurer en continu ce paramètre. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que c'est dans la coupe d'abri que les sommes de Q 10 sont les plus homogènes, et c'est précisément le milieu dans lequel la température des bourgeons est la plus proche de la température de l'air. En effet, dans la coupe d'abri, les phénomènes de refroidissement ou d'échauffement (par rayonnement) sont diminués par suite de l'action protectrice des houppiers. Il en résulte que l'on peut considérer les sommes de Q 10 dans ce milieu, comme étant les plus proches de la réalité, soit :

502 pour Abies alba Ecouves
670 pour Picea abies
555 pour Pseudotsuga menziesii.

L'explication des écarts dans les dates de débourrement pourrait alors être la suivante :

- dans le cas des espèces "précoces" Abies alba et Pseudotsuga menziesii, les bourgeons subiraient avant et pendant la phase critique du débourrement des températures en moyenne plus élevées (température minima plus élevée) dans la coupe d'abri et la clairière que dans la coupe rase.

- dans le cas des espèces "tardives" Abies nordmanniana et Picea abies les bourgeons subiraient, dans la phase critique du débourrement, des températures en moyennes voisines dans les trois milieux étudiés, à cause des températures maxima plus élevées dans la coupe rase.

Il en résulterait alors des dates de débourrement très proches.

(1) On peut aussi remarquer que nous avons utilisé comme date de sommation le 1er janvier, ce qui n'est pas forcément exact. La difficulté de détermination précise de la date initiale de sommation provient probablement du fait que nous n'avions que 4 années de mesure.

3 - Conclusions

Le débourrement des conifères que nous avons étudié (Abies alba, Abies nordmanniana, Picea abies et Pseudotsuga menziesii) est fortement conditionné par la température. Nous avons pu calculer les sommes de température (sommes de Q 10) nécessaires à leur débourrement. Ces sommes de température sont des constantes caractéristiques de l'espèce ou de la provenance.

Dans la première partie de notre travail, nous avons montré que la nature et la structure du couvert forestier influençaient considérablement la température de l'air et du sol. Des profils thermiques types ont été mis en évidence. L'interaction de ces conditions microclimatiques et des exigences thermiques des différentes espèces ou provenance entraîne selon les situations des différences notables dans la date de débourrement. Ainsi, par rapport au plein découvert que nous avons pris comme référence, pour une même provenance, les arbres installés dans la coupe d'abri et dans la clairière, débourrent plus précocement. Les différences peuvent aller jusqu'à 8 jours pour Abies alba.

Nous avons ici une illustration particulièrement démonstrative de l'intérêt de l'étude des interactions forêt  climat. En effet, dans ce cas précis, il est probable que sans cette étude, nous aurions sous-estimé leur importance. Les études phénologique des espèces forestières ne peuvent être entreprises valablement que si on prend en compte les conditions microclimatiques des sites où sont effectuées ces études.

III. LA CROISSANCE

La croissance (1) de l'arbre peut être interprétée comme le résultat de l'interaction entre le génotype et les conditions écologiques et parmi elles les facteurs climatiques ou microclimatiques.

Nous distinguerons la croissance en hauteur qui s'effectue à partir des méristèmes apicaux de la croissance en diamètre qui résulte de la multiplication de l'assise cambiale.

Chez les arbres forestiers de nos régions, le rythme de ces deux phénomènes n'est pas le même. En particulier, chez les résineux que nous avons étudié, la croissance en hauteur s'effectue de Mai à Août, par contre, la croissance en diamètre débute en Avril et s'arrête en Octobre. Aussi l'influence des facteurs écologiques peut elle être différente.

A. METHODES D'ETUDE

Nous avons effectué des mesures de croissance sur l'ensemble des plants des différentes espèces (*voir tableau n° 23*) installés dans les trois milieux retenus : la coupe d'abri, la clairière et la coupe rase (*voir caractéristiques dans le tableau n° 1*).

La croissance en hauteur a été mesurée pendant la saison de végétation deux fois par semaine. Les mesures étaient effectuées directement sur la flèche à l'aide d'un mètre gradué en millimètres. La précision de la mesure était de ± 1 mm.

La croissance en diamètre a été mesurée au collet de chacun des arbres, à la fin de chaque saison de végétation (Novembre). En effet, en raison du jeune âge des arbres étudiés, il n'était pas possible d'effectuer correctement des mesures périodiques. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un comparateur industriel adapté par nos soins pour être utilisé sur le terrain.

(1) Il est quelquefois difficile de distinguer croissance et développement. Par croissance, nous entendons ce qui évolue de façon continue et que l'on peut mesurer (pousse, diamètre du tronc...). Le développement correspond à une modification qualitative de la forme du végétal.

Le traitement statistique des données recueillies a été effectué en partie par la Station de Biométrie du C.N.R.F., en partie par nous-même sur une calculatrice électronique de bureau.

B. EVOLUTION DE LA CROISSANCE CHEZ LES DIFFERENTES ESPECES ETUDIEES

1 - Influence globale du milieu

L'influence global de chacun des milieux (ensemble des facteurs microclimatiques) (2) peut être évaluée par la mesure de la croissance en hauteur et de la croissance en diamètre (*photographies 6. 7. 8 - Annexe*).

a) La croissance en hauteur

Les mesures ont été effectuées de 1967 à 1973. Le tableau n° 27 donne les croissances moyennes annuelles pour les différentes espèces et les trois milieux étudiés :

- coupe d'abri,
- coupe rase,
- clairière.

Les trois milieux peuvent être classés de la façon suivante par croissance de plus en plus importante : coupe d'abri, coupe rase, clairière. Les écarts à la clairière sont considérables, par exemple en 1970 :

	Coupe d'abri mm	% Clairière	Coupe rase mm	% Clairière
<u>Abies alba</u> Ecouves	- 180	- 75.0	170	- 70.8
<u>Abies alba</u> Nebias	- 160	- 70.8	122	- 54.8
<u>Abies alba</u> Canigou	- 213	- 74.5	196	- 68.5
<u>Abies Nordmanniana</u>	- 173	- 81.6	125	- 59.0
<u>Picea Abies</u>	- 261	- 91.9	87	- 30.6
<u>Pseudotsuga Menziesii</u>	- 453	- 81.2	163	- 29.3

En hauteur totale des arbres en 1973, soit après 7 ans d'expérimentation, les écarts sont aussi très importants et sont significatifs (1) pour toutes les espèces étudiées sauf pour Picea abies qui présente des hauteurs totales très voisines dans la clairière et la coupe rase.

(1) Au seuil de $P = 0,05$

TABLEAU N° 27

CROISSANCE (EN MM) ANNUELLE EN HAUTEUR DES DIFFERENTES

ESPECES DANS LES 3 MILIEUX : COUPE D'ABRI

CLAIRIERE

COUPE RASE

Espèces	Situation	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	Hauteur (1) totale
<u>Abies alba</u> Ecouves	Coupe d'abri	45	31	68	60	55	52	66	486
	Clairière	59	<u>129</u>	<u>218</u>	<u>240</u>	<u>311</u>	<u>343</u>	<u>402</u>	<u>1 822</u>
	Coupe rase	59	-	74	70	198	205	294	972
<u>Abies alba</u> Nebias	Coupe d'abri	52	28	65	66	60	60	69	507
	Clairière	57	<u>115</u>	<u>213</u>	<u>226</u>	<u>285</u>	<u>309</u>	<u>315</u>	<u>1 612</u>
	Coupe rase	57	55	64	104	255	226	312	1 045
<u>Abies alba</u> Canigou	Coupe d'abri	66	26	68	73	66	61	76	592
	Clairière	65	<u>117</u>	<u>362</u>	<u>286</u>	<u>327</u>	<u>350</u>	<u>357</u>	<u>1 952</u>
	Coupe rase	52	37	67	90	161	227	304	1 045
<u>Abies</u> <u>nordmanniana</u>	Coupe d'abri	33	25	39	39	39	42	48	356
	Clairière	49	<u>98</u>	<u>173</u>	<u>212</u>	<u>232</u>	<u>304</u>	<u>333</u>	<u>1 519</u>
	Coupe rase	33	53	83	87	141	211	278	961
<u>Picea abies</u>	Coupe d'abri	74	18	49	23	29	34	53	468
	Clairière	<u>144</u>	<u>145</u>	<u>286</u>	<u>284</u>	<u>319</u>	334	463	2 102
	Coupe rase	92	85	250	197	310	<u>430</u>	<u>632</u>	<u>2 190</u>
<u>Pseudotsuga</u> <u>menziessi</u>	Coupe d'abri	107	92	107	105	99	125	124	896
	Clairière	<u>187</u>	<u>393</u>	<u>442</u>	<u>558</u>	620	<u>843</u>	<u>783</u>	<u>3 935</u>
	Coupe rase	120	-	240	395	<u>695</u>	685	582	2 978

(1) Les valeurs les plus élevées sont soulignées

(1) Fin 1973

TABLEAU N° 28

CROISSANCE TOTALE (EN MM) 1967 - 1973 ET EN POURCENTAGE
DE LA CLAIRIERE

	Coupe d'abri		Coupe rase		Clairière
	mm		mm		mm
<u>Abies alba</u> Ecouves	351	20,9 %	804	48,0 %	1675
<u>Abies alba</u> Nebias	359	24,7 %	870	59,9 %	1452
<u>Abies alba</u> Canigou	369	21,3 %	837	50,1 %	1729
<u>Abies Nordmanniana</u>	232	16,9 %	825	59,9 %	1376
<u>Picea abies</u>	220	11,8 %	1926	103,4 %	1862
<u>Pseudotsuga menziesii</u>	667	18,0 %	2751	74,2 %	3706

Dans la clairière, la croissance totale en hauteur des arbres est donc considérablement plus importante que dans les autres traitements pour toutes les espèces sauf Picea abies. Nous pouvons remarquer déjà que ce résultat d'ensemble s'accorde parfaitement avec les conditions microclimatiques très favorables qui régissent dans la clairière.

Dans le détail des années, des remarques s'imposent :

- en 1967, c'est-à-dire dans l'année qui a suivi la plantation expérimentale, des différences statistiquement significatives ont été observées entre les trois milieux pour certaines espèces : Picea abies et Pseudotsuga menziesii. Ainsi les conditions écologiques de l'année ont eu pour ces espèces une influence déterminante. Il s'agit là d'un résultat intéressant car généralement (AUSSENAC, 1973), on estimait que la croissance de l'année (n) était surtout influencée par les conditions écologiques de l'année n-1 .

- Dans les années suivantes 1968 1969 - 1970, l'influence des conditions microclimatiques des 3 milieux s'est traduite par des croissances en hauteur significativement différentes : par ordre croissant : coupe d'abri, coupe rase, clairière.

- A partir de 1971, on observe pour Picea abies, un phénomène particulier ; la croissance en hauteur dans la coupe rase devient égale et puis supérieure (différence non significative) à la croissance dans la clairière. En 1973, on note que cette tendance est générale chez toutes les autres espèces sans pour autant être significative.

On voit ainsi apparaître clairement le rôle déterminant du microclimat pour la croissance en hauteur des arbres forestiers dans leur jeune âge.

L'étude du rythme de croissance est intéressant. Les figures n° 31, 32, 33, 34, 35 donnent, en fonction du temps, l'évolution des croissances en hauteurs cumulées durant les années 1967, 1968, 1969, 1970 et 1971. Les courbes obtenues sont des courbes en "S" caractéristiques. Il est possible de remarquer à la fois : - le comportement différent de celui des espèces et provenances étudiées et l'évolution relative de la croissance dans les 3 milieux. Ainsi, on peut voir que le comportement des sapins est différent des deux autres espèces : Picea abies et Pseudotsuga menziesii. En effet, de 1967 à 1971 pour les sapins, le classement (par ordre croissant) est le même : coupe d'abri, coupe rase, clairière ; alors que dans le cas de Picea abies et de Pseudotsuga menziesii à partir de 1970, les courbes de croissance de la coupe se rapprochent de celles de la clairière. Nous verrons par la suite l'importance de ces résultats pour la définition de l'écophysiologie de ces différentes espèces.

Il est maintenant intéressant de se demander si, pour une espèce déterminée, des conditions microclimatiques différentes peuvent influencer certaines caractéristiques des phénomènes de croissance :

- durée de la période de croissance,
- période de croissance maximum,
- fin de la croissance.

FIGURE 31

COURBES DE CROISSANCE MOYENNE EN HAUTEUR EN FONCTION DU TEMPS
DANS LES TROIS MILIEUX ETUDIES : CLAIRIERE, COUPE D'ABRI ET
COUPE RASE.

- 1967 -

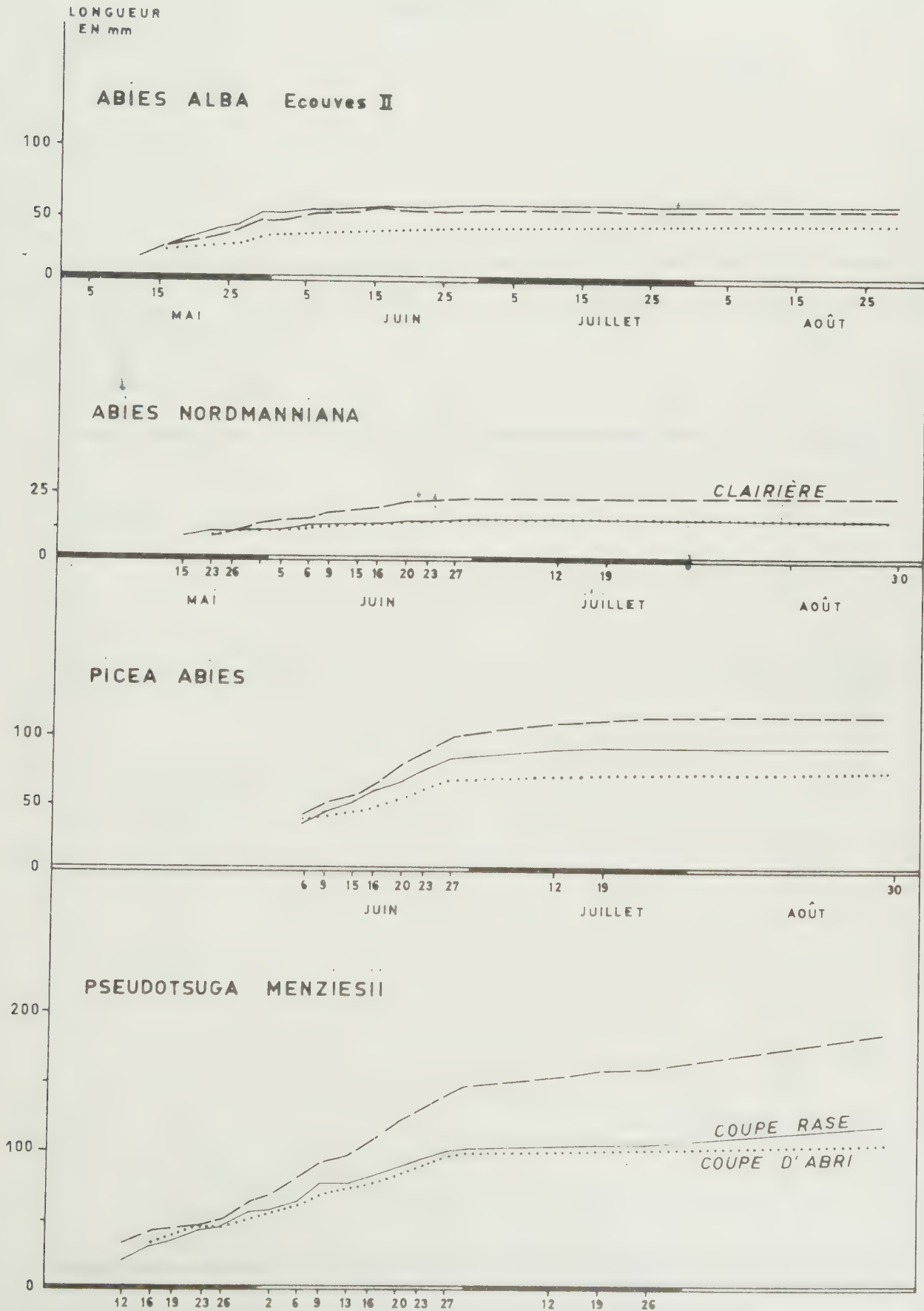


FIGURE 32

COURBES DE CROISSANCE MOYENNE EN HAUTEUR EN FONCTION DU TEMPS
DANS LES TROIS MILIEUX ETUDIES : CLAIRIERE, COUPE D'ABRI ET
COUPE RASE.

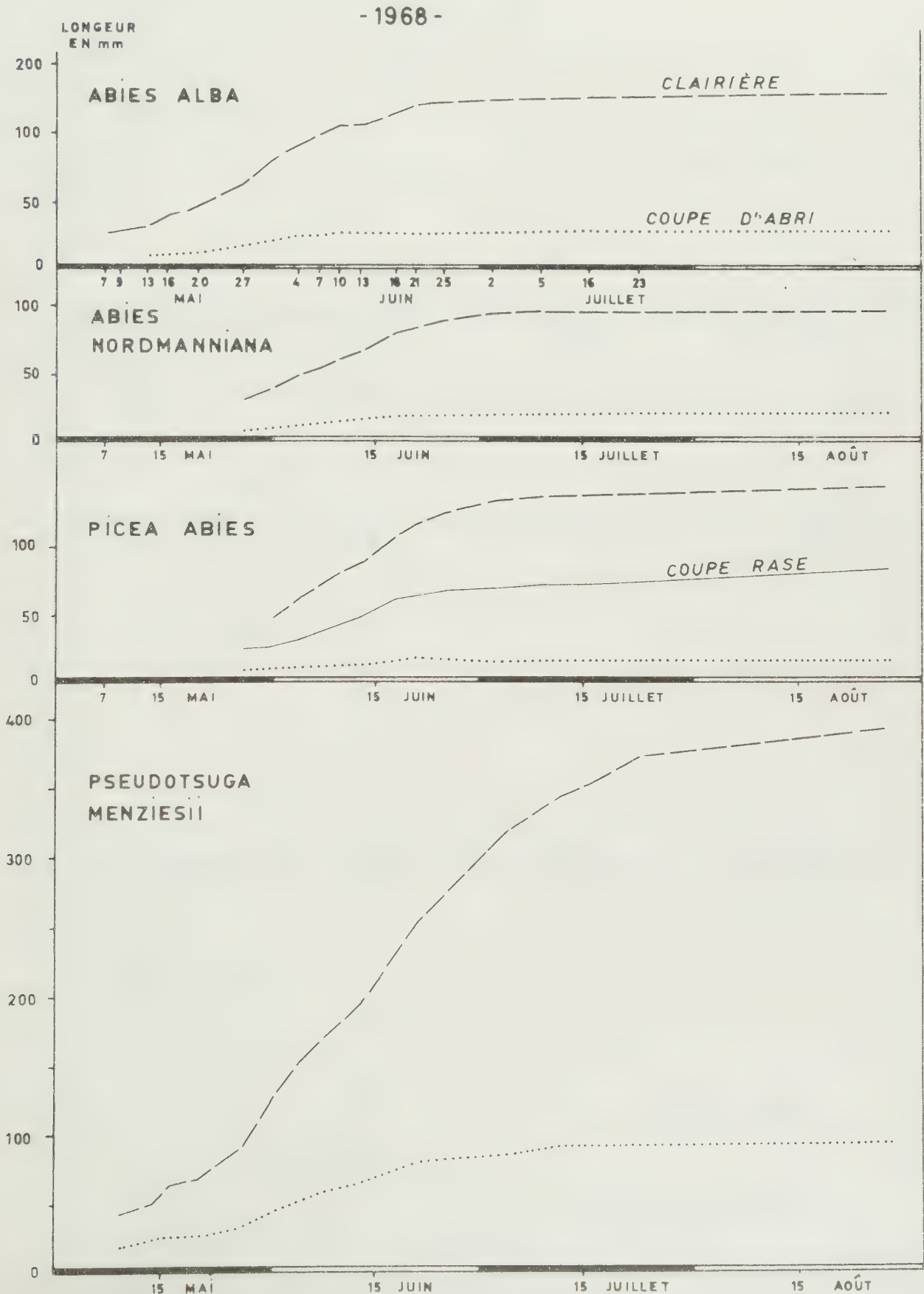


FIGURE 33

COURBES DE CROISSANCE MOYENNE EN HAUTEUR EN FONCTION DU TEMPS
DANS LES TROIS MILIEUX ETUDIES : CLAIRIERE, COUPE D'ABRI ET
COUPE RASE.

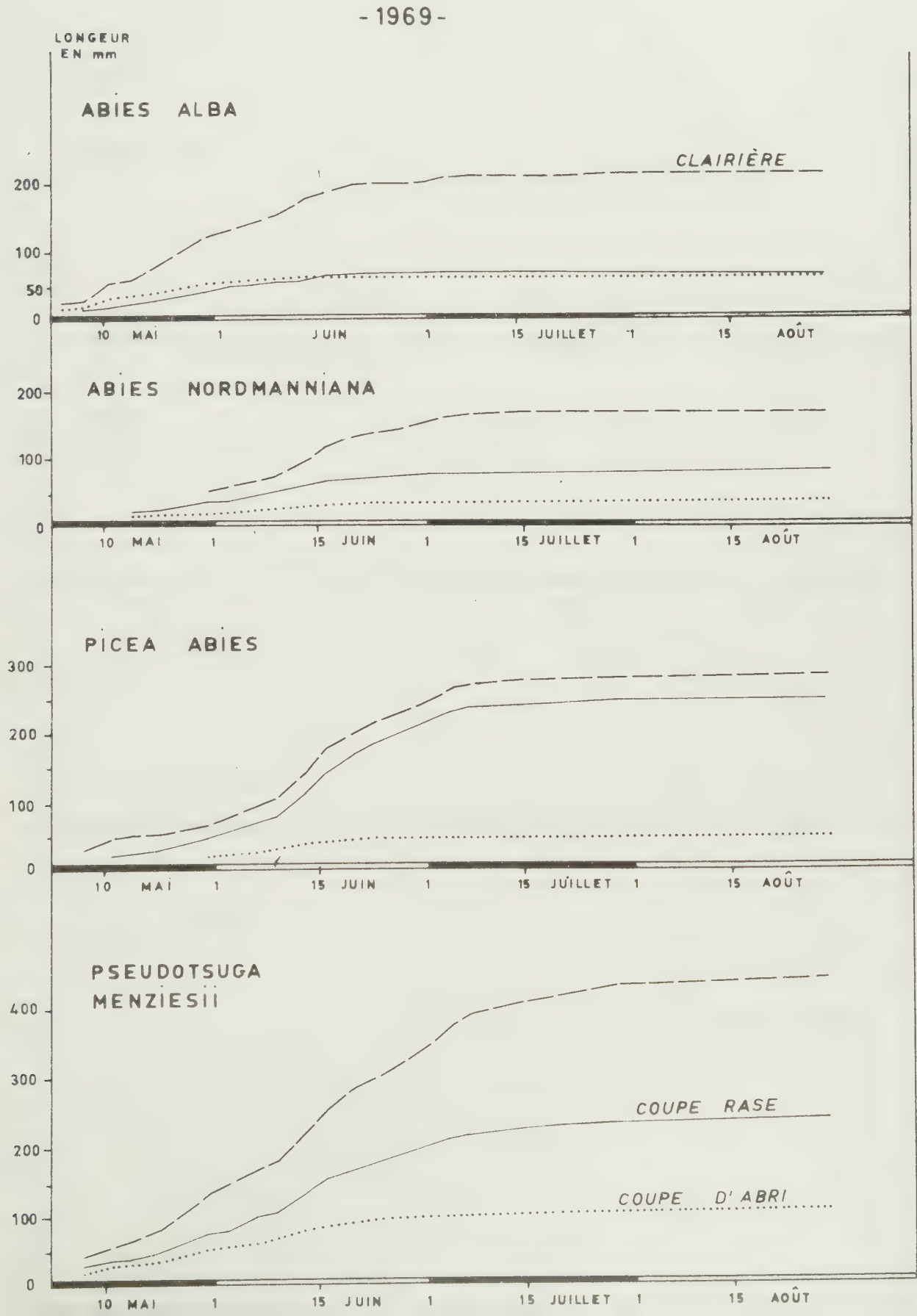


FIGURE 34

COURBES DE CROISSANCE MOYENNE EN HAUTEUR EN FONCTION DU TEMPS
DANS LES TROIS MILIEUX ETUDIES : CLAIRIERE, COUPE D'ABRI ET
COUPE RASE.

- 1970 -

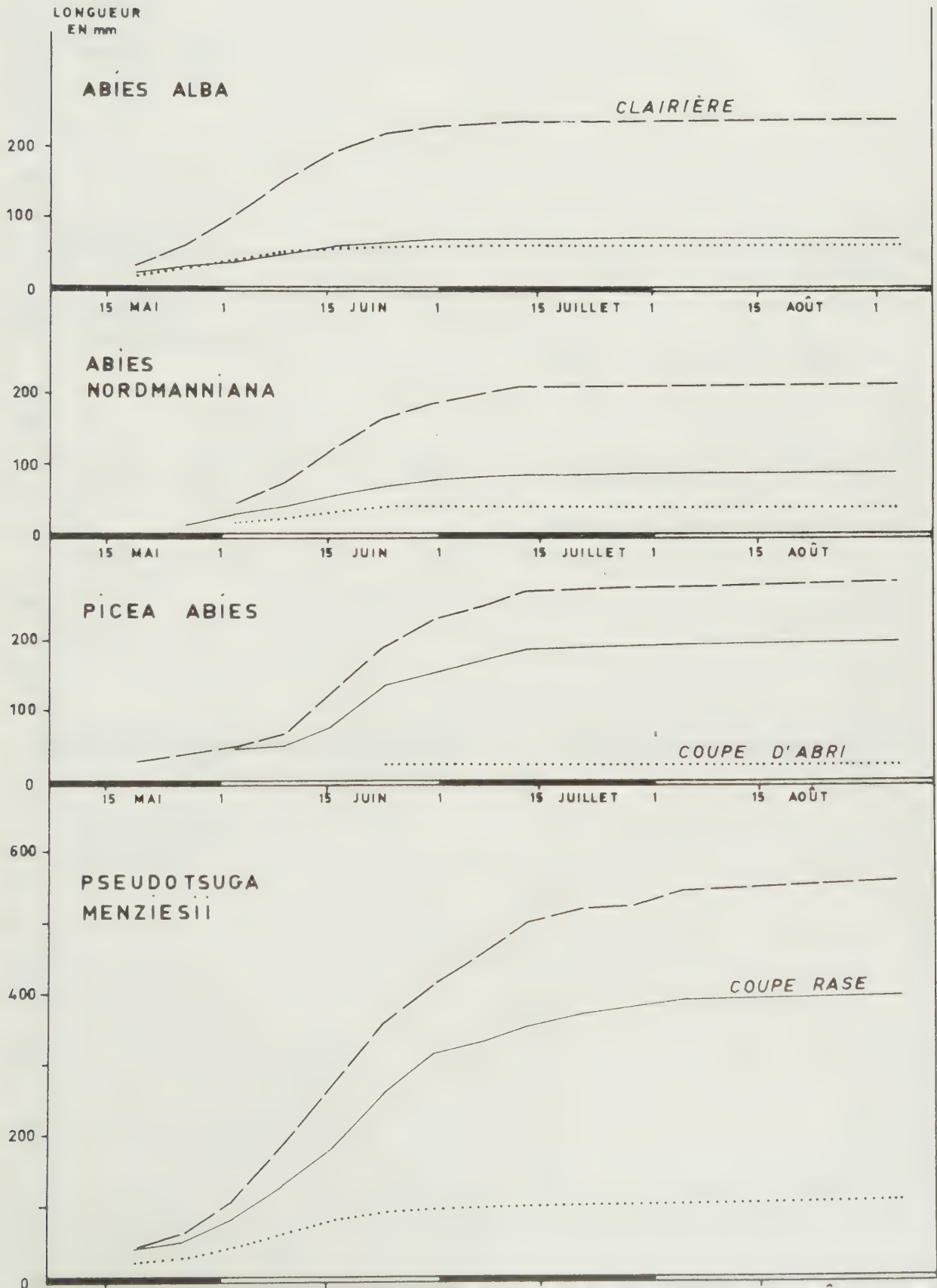
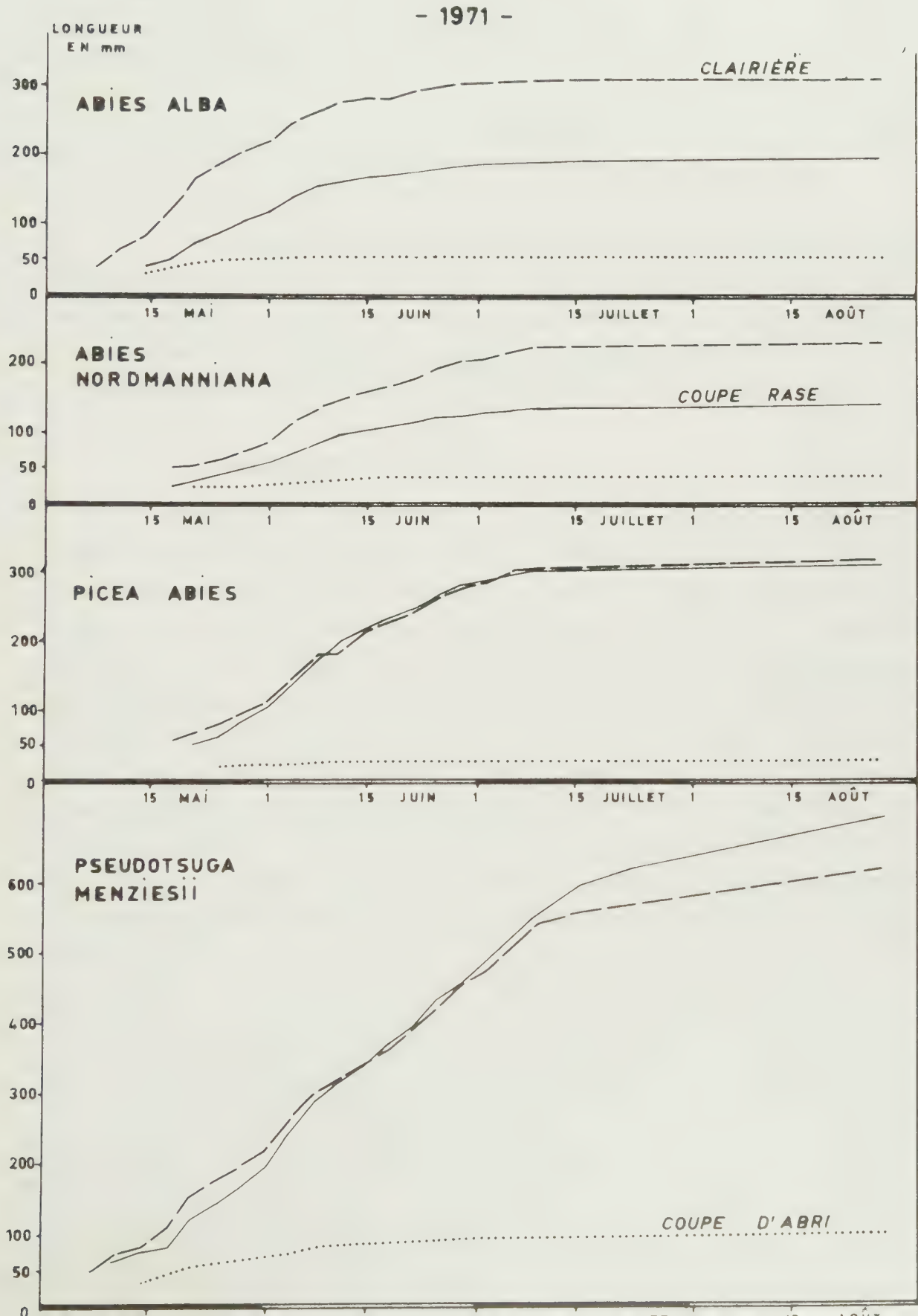


FIGURE 35

COURBES DE CROISSANCE MOYENNE EN HAUTEUR EN FONCTION DU TEMPS
DANS LES TROIS MILIEUX ETUDIES : CLAIRIERE, COUPE D'ABRI ET
COUPE RASE.



L'analyse statistique fait apparaître un certain nombre de différences significatives mais il est difficile d'établir une "loi" générale, si bien qu'il est impossible d'en tirer un enseignement précis quant à l'effet des facteurs microclimatiques sur la durée, la fin de la période de croissance et la période de croissance maximum.

En ce qui concerne l'accroissement total (1967-1973), il est possible d'effectuer un classement des espèces dans les trois milieux :
(voir à ce sujet le tableau n° 28).

On remarque tout de suite que dans les 3 milieux étudiés le Pseudotsuga menziesii arrive en tête. Dans la coupe d'abri Picea abies a la croissance la plus faible. Par contre, dans les deux autres situations cette espèce arrive en deuxième position derrière Pseudotsuga menziesii. Il y a ici aussi l'expression d'un comportement écologique intéressant.

b) La croissance en diamètre

Les mesures ont été effectuées de 1968 à 1973. Le tableau n° 29 présente les résultats obtenus (croissances moyennes annuelles). Le diamètre final est, pour toutes les espèces étudiées, significativement plus faible dans la coupe d'abri que dans les deux autres milieux. Il est le plus important dans la clairière pour les Sapins. Par contre, pour Picea abies et Pseudotsuga menziesii c'est la coupe rase qui conduit au diamètre final le plus élevé. Ici encore, ces deux dernières espèces se différencient assez nettement du groupe des sapins. Dans le détail des années, il est sûrement intéressant de remarquer que chez Picea abies et Pseudotsuga menziesii dès 1968, la coupe rase a la croissance en diamètre la plus élevée. Chez les Sapins, à partir de 1970, (A. a Ecouves) 1971 (A. a Nebias - A. a. Canigou - A. Nordm.) la croissance annuelle de la coupe rase se rapproche de celle de la clairière, devient égale puis supérieure en 1972.

TABLEAU N° 29

CROISSANCE ANNUELLE (1) EN DIAMÈTRE (1/100 mm) DES DIFFÉRENTES ESPÈCES DANS LES 3 MILIEUX :
COUPE D'ABRI, CLAIRIÈRE ET COUPE RASE

	Situation	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	Diamètre (1) final
Abies alba Ecouves	Coupe d'abri	-	105	60	169	148	104	86	949
	Clairière	-	<u>374</u>	<u>392</u>	<u>663</u>	<u>333</u>	<u>494</u>	<u>504</u>	<u>3 312</u>
	Coupe rase	-	224	225	428	<u>396</u>	<u>556</u>	395	2 444
Abies alba Nebias	Coupe d'abri	-	138	91	161	139	112	100	992
	Clairière	-	<u>371</u>	<u>395</u>	<u>644</u>	<u>368</u>	<u>473</u>	403	<u>3 075</u>
	Coupe rase	-	214	194	564	350	616	464	2 659
Abies alba Canigou	Coupe d'abri	-	142	98	142	156	151	82	1 138
	Clairière	-	<u>431</u>	<u>429</u>	<u>630</u>	<u>360</u>	514	<u>434</u>	<u>3 381</u>
	Coupe rase	-	<u>398</u>	211	454	339	<u>633</u>	432	2 737
Abies nordmanniana	Coupe d'abri	-	118	86	118	158	127	118	1 056
	Clairière	-	335	<u>500</u>	<u>772</u>	<u>372</u>	647	564	<u>3 772</u>
	Coupe rase	-	<u>396</u>	340	584	347	<u>849</u>	<u>642</u>	3 326
Picea abies	Coupe d'abri	-	113	63	223	163	131	78	917
	Clairière	-	649	502	912	643	758	814	4 610
	Coupe rase	-	<u>749</u>	<u>534</u>	868	<u>823</u>	<u>1 497</u>	<u>1 310</u>	<u>5 927</u>
Pseudotsuga menziesii	Coupe d'abri	-	154	99	160	201	134	127	1030
	Clairière	-	718	<u>655</u>	1 170	844	<u>1 232</u>	898	6 014
	Coupe rase	-	<u>749</u>	433	<u>1 457</u>	<u>1 242</u>	1 581	<u>1 412</u>	<u>7 023</u>

(1) Les valeurs les plus élevées sont soulignées

(1) Fin 1973

2 - Influence globale de la température

Dans le paragraphe précédent, nous avons étudié l'influence globale des facteurs microclimatiques, parmi ces derniers, la température a une action primordiale sur les phénomènes de développement des arbres.

Nous étudierons l'influence de la température uniquement sur la croissance en hauteur car nous n'avons pas effectué de mesure périodique de la croissance en diamètre.

a) Méthodes d'études

L'étude a été entreprise à partir du dispositif expérimental décrit au chapitre 1, mais elle n'a porté que sur 4 des 6 espèces :

Abies alba Ecouves, Abies nordmanniana, Picea abies, Pseudotsuga menziesii.

Les principaux facteurs microclimatiques ont été étudiés de 1967 à 1972 (*voir première partie*). La température de l'air a été relevée à 1,50 m de hauteur dans chacun des trois milieux : coupe d'abri, coupe rase, clairière. La croissance en hauteur a été mesurée, pendant la saison de végétation, deux fois par semaine. A partir de ces données de base, nous avons pu calculer les valeurs moyennes pour chaque espèce dans chaque milieu et effectuer les calculs statistiques correspondants.

b) Détermination des seuils apparents de végétation

A partir des mesures effectuées deux fois par semaine, nous avons étudié la relation qui existait entre la température moyenne journalière de l'air et l'accroissement moyen journalier. Cette relation n'est pas très bonne. Les coefficients de corrélation que nous avons obtenus sont faibles et pas toujours significatifs. En fait, ceci s'explique aisément, ainsi que le fait remarquer DURAND (1967), si l'on tient compte du rythme interne d'évolution de la croissance chez les arbres. L'accroissement de la pousse dépend de sa taille. ROBERTSON (1908) a proposé de quantifier l'accroissement par la relation

suivante : $\frac{\Delta l}{\Delta t} = k l \left(1 - \frac{l}{L}\right)$ dans laquelle Δl est l'accroissement pendant le temps Δt , l la longueur de la pousse à l'instant t , L la longueur de la pousse à la fin de la saison de végétation, k est un coefficient qui varie avec les facteurs écologiques. Il est dès lors possible ainsi que l'on fait DURAND et al (1967) de calculer :

$$k = \frac{1}{l \left(1 - \frac{l}{L}\right)} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

Ce coefficient de croissance varie avec la température. Quand k est nul $\frac{\Delta l}{\Delta t}$ s'annule, l'accroissement est donc égal à zéro.

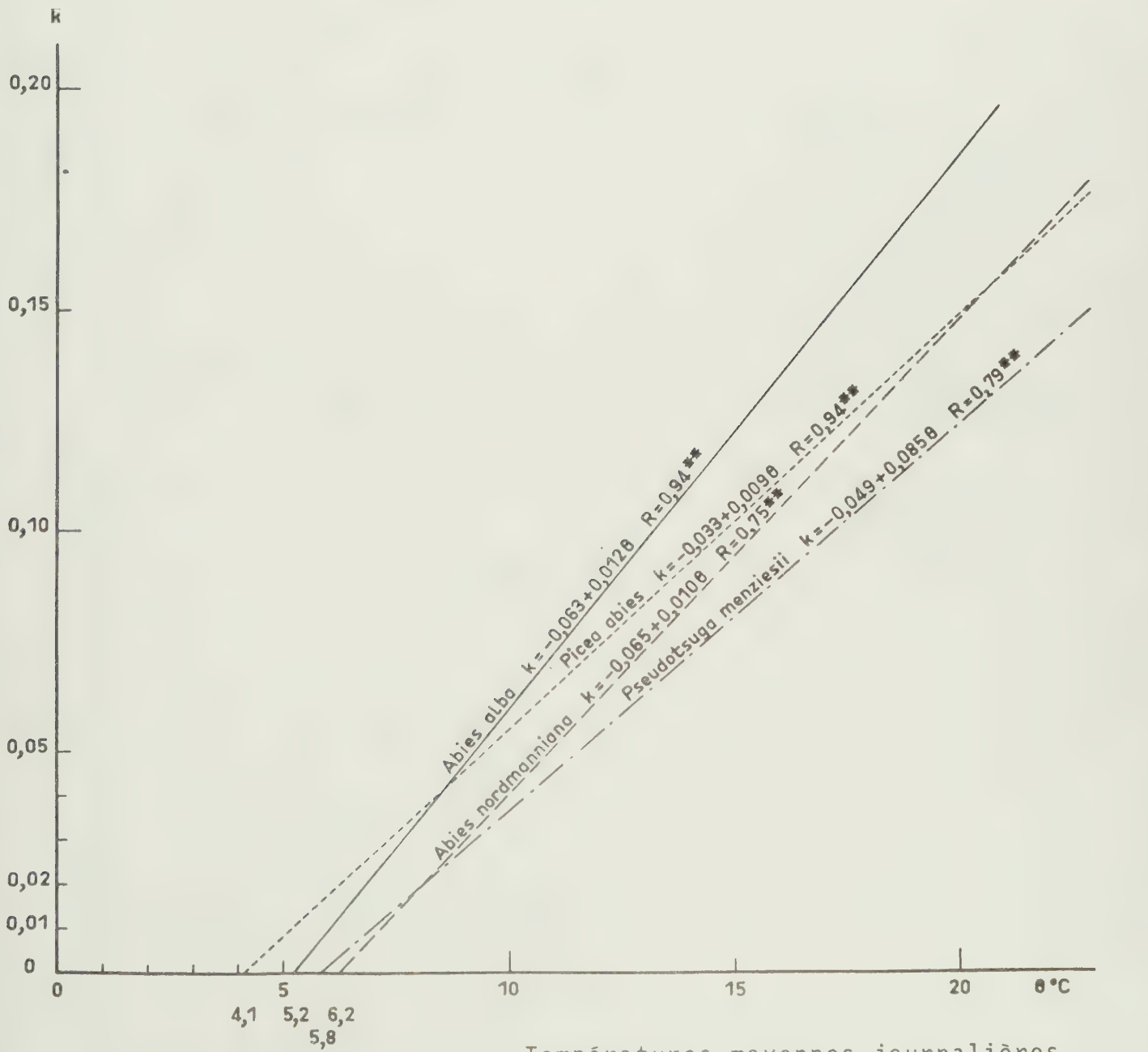
La figure n° 36 donne pour les espèces étudiées les équations de régression qui traduisent la variation de k en fonction des températures moyennes journalières ordonnées par températures croissantes. L'étude comparative de ces équations de régression à partir de la méthode proposée par DECOURT (1971) nous a montré qu'elles ne sont pas toutes significativement différentes les unes des autres. Il est seulement apparu que, d'une part Abies alba était significativement différent de Abies nordmanniana et de Pseudotsuga menziesii et que d'autre part Picea abies était significativement différent de Pseudotsuga menziesii.

Le coefficient k s'annule pour les températures suivantes :

- <u>Abies alba</u> Ecouves	5,2° C
- <u>Abies nordmanniana</u>	6,2° C
- <u>Picea abies</u>	4,1° C
- <u>Pseudotsuga menziesii</u>	5,8° C

Ces températures pour lesquelles k est nul correspondent au seuil apparent de végétation (ou zéro de végétation). Des différences existent bien qu'elles ne soient pas toutes significatives et il est quand même intéressant de remarquer que Abies nordmanniana, espèce la plus "méridionale", a le seuil de végétation le plus élevé, alors que l'épicéa apparaît comme l'espèce la plus "froide". Ces seuils de végétation différents peuvent peut être expliquer en partie le comportement différent des espèces en plaine et en montagne. Par exemple, en plaine et basse montagne Pseudotsuga menziesii pousse mieux que Picea abies; en montagne au-dessus de 1000m c'est le contraire.

FIGURE 36
VARIATION DU COEFFICIENT DE CROISSANCE K EN FONCTION DE
LA TEMPERATURE MOYENNE JOURNALIERE DE L'AIR.



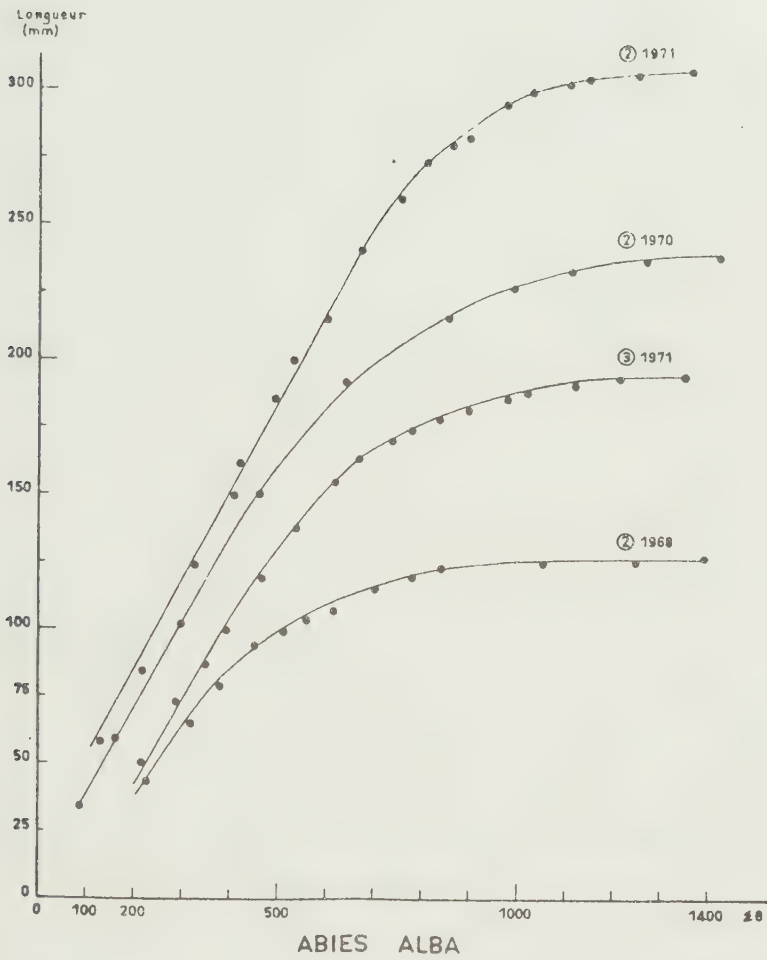
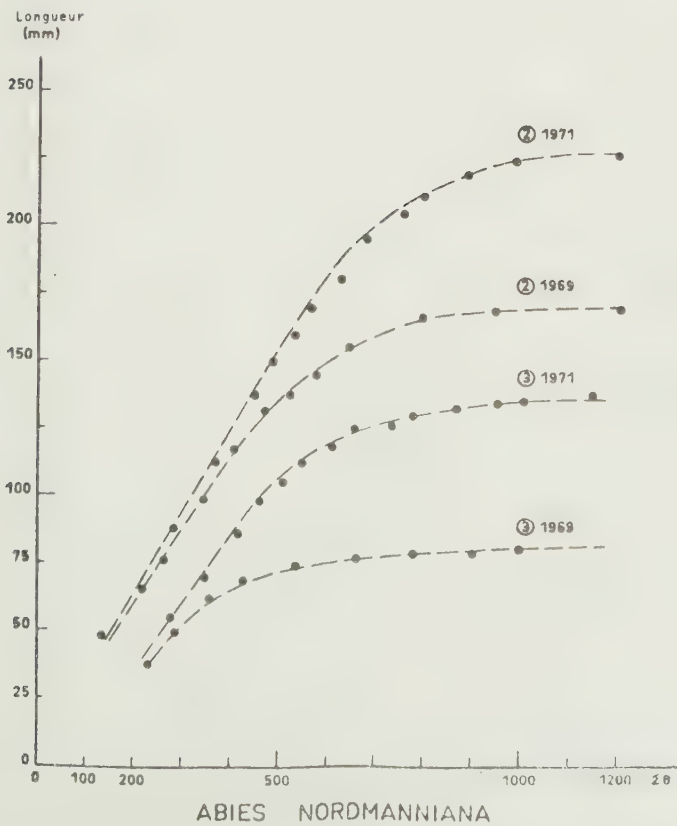


FIGURE 37
RELATION ENTRE LA
LONGUEUR MOYENNE
DE LA POUSSE ET
LA SOMME DES
TEMPERATURES CHEZ
ABIES ALBA ET
ABIES NORDMANNIANA.



② Clairière
③ Coupe rase

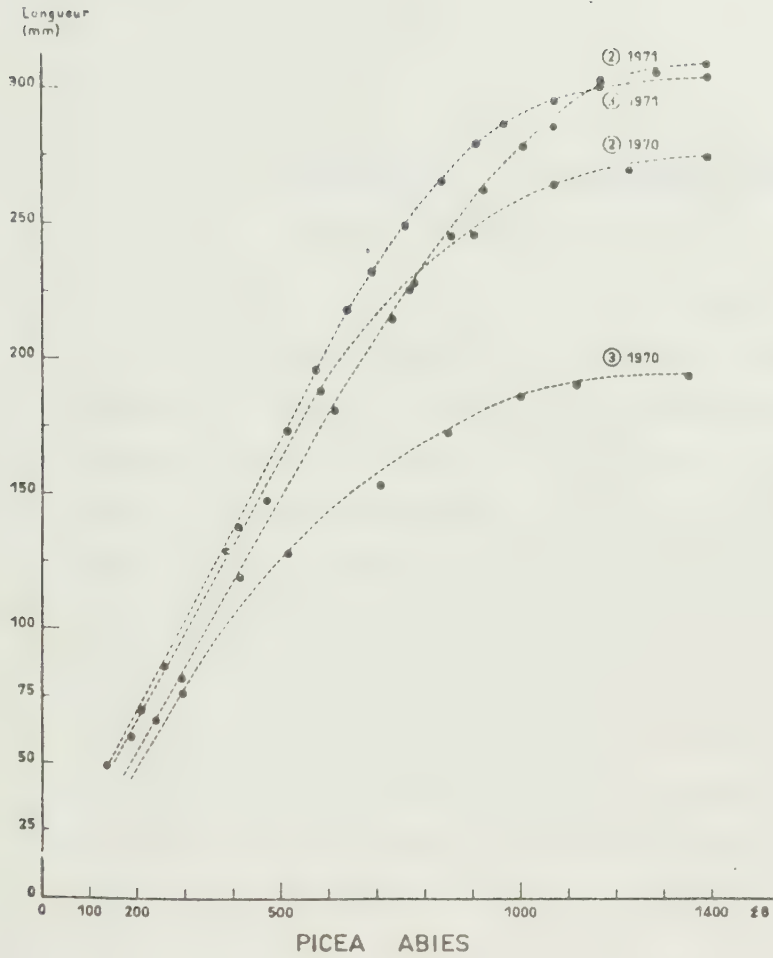
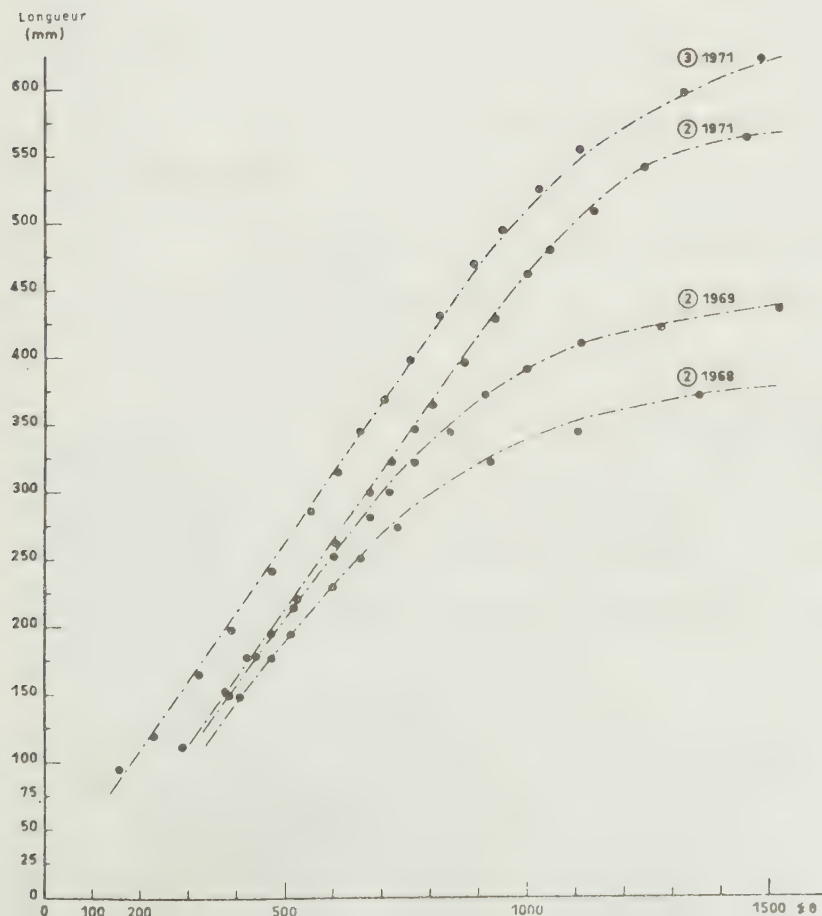


FIGURE 38
RELATION ENTRE LA
LONGUEUR MOYENNE
DE LA POUSSE ET
LA SOMME DES
TEMPERATURES CHEZ
PICEA ABIES ET
PSEUDOTSUGA MENZIESII.



(2) Clairière
(3) Coupe rase

c) Expression de la croissance en hauteur en fonction des sommes de température.

De nombreux auteurs ont essayé de lier la croissance à la température et plus précisément aux sommes de températures. Ainsi que nous l'indiquions au chapitre précédent, deux méthodes sont utilisables : la somme des températures et la somme des coefficients de Q 10. Dans une mise au point, DURAND (1967) remarque que la méthode des sommes de température est surtout valable au printemps et en été (saison de végétation). Les sommes de Q 10 ne conviennent pas quand les températures moyennes sont élevées. A partir de cette remarque et de l'étude de deux méthodes, nous avons finalement retenu la somme des températures. L'étude de la relation liant le coefficient k à la température moyenne nous a permis de déterminer le seuil apparent de végétation des espèces étudiées (voir paragraphe précédent). Les sommations de température ont été faites à partir des températures moyennes journalières et en utilisant l'expression suivante (BIDABE 1967) :

$$(\theta_{\max} - s) + (\theta_{\min} - s)$$

$\theta_{\max}$: température maximum
 $\theta_{\min}$: température minimum
 s : seuil apparent de végétation.

avec la condition suivante $\theta_{\max} - s$ ou $\theta_{\min} - s = 0$ quand $\theta_{\max}$ ou $\theta_{\min} \leq s$.

Les sommations ont été effectuées pour chaque espèce à partir du stade b3 (1) du débourrement pour les différents milieux et années.

Les figures n° 37, 38 montrent en exemple les courbes obtenues. En fait, il s'agit ici aussi de courbes caractéristiques en "S". La partie inférieure de ces courbes n'est pas représentée sur ces figures car le début véritable de la croissance s'effectue au stade b 2,5, or, pour des raisons pratiques nous sommes partis du stade b 3 ultérieur mais plus facile à préciser car il représente un stage phénologique observable.

(1) Ce stade correspond à la phase de développement où les aiguilles sont partiellement libérées. Le stade réel de débourrement se situe entre le stade b2 et le stade b3 au moment de l'éclatement du bourgeon (Aussenac, 1967) (voir aussi paragraphe sur le débourrement).

L'intégration de l'équation proposée par ROBERTSON :

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = kl \left(1 - \frac{l}{L} \right) \text{ conduit aux équations (DURAND 1967)}$$

$$\text{Log} \frac{1}{L - l} = k (t - t_0)$$

$$l = \frac{L}{1 + e^{-k(t - t_0)}} \quad \text{avec } t_0 \text{ pour } l = \frac{L}{2}$$

Cette équation peut être retenue pour ajuster les courbes de croissance. En fait, la variable temps doit être remplacée par la somme des températures. GESLIN (1944) a montré que cette transformation était valable.

D'autres types de fonction ont été proposés sans que pour autant l'ajustement soit meilleur (RICKEFFS 1967). Les courbes que nous avons obtenues sont comparables entre elles bien que, évidemment, elles correspondent à des croissances finales différentes. Elles présentent une portion qui peut être assimilée à une droite. La pente de cette droite ou plus précisément la pente de la tangente au point d'inflexion peut être avec une bonne approximation considérée comme la même (1) pour toutes les courbes d'une même espèce. Ce fait avait déjà été remarqué par GESLIN (1944). Les coefficients angulaires sont les suivants :

- <u>Abies alba</u> Ecouves	0,332
- <u>Abies nordmanniana</u>	0,308
- <u>Picea abies</u>	0,336
- <u>Pseudotsuga menziesii</u>	0,513

On remarque que la valeur la plus élevée revient au Pseudotsuga menziesii suivent ensuite Picea abies et Abies alba et enfin Abies nordmanniana. Ces coefficients angulaires se classent dans le même ordre que les potentialités de production ligneuse. Ces résultats suggèrent que les potentialités de croissance des différentes espèces sont conditionnées par ces mécanismes d'action.

(1) En réalité, il est probable que la pente n'est pas tout à fait constante et que la croissance ne suit pas tout à fait la loi logistique.

L'accomplissement d'une phase de développement peut être relié aux sommes de températures. Pour la réalisation de la pousse annuelle, les sommes de température peuvent être estimées à (1):

- 1240 pour Abies alba Ecouves II (seuil de sommation 5,2° C)
- 1200 pour Abies nordmanniana (seuil de sommation 6,2° C)
- 1400 pour Picea abies (seuil de sommation 4,1° C)
- 1600 pour Pseudotsuga menziesii (seuil de sommation 5,8° C)

Dans le détail des milieux étudiés et des années, il est très difficile d'estimer la diversité des sommes de températures nécessaires. En effet, compte-tenu de la précision des mesures et de la difficulté d'estimer la croissance en fin d'accroissement, il n'est pas facile de calculer avec précision la date de l'arrêt de l'allongement de la flèche. Or, à ce moment là de la saison de végétation, les températures sont généralement élevées pour des accroissements faibles, donc les erreurs sur les sommes peuvent être relativement importantes.

(1) A compter du stade b 3 du débourrement et d'après 5 ans d'observation. On pourra bien entendu diviser ces valeurs par deux pour les comparer avec les chiffres obtenus par les auteurs qui ont utilisé les températures moyennes pour faire leurs sommations.

d) Conclusions

Les résultats obtenus pour les seuils apparents de végétation font apparaître des différences intéressantes (bien que toutes ne soient pas significatives) entre les espèces étudiées. Les valeurs trouvées sont cohérentes avec ce que l'on connaît de la biologie des espèces.

L'*Epicea* apparaît comme la plus "septentrionale" d'entre elles. Au Canada, WORRALL (1973) avance pour cette espèce un seuil apparent de 2,6° C. Cette valeur, plus faible que celle que nous avons obtenue, pourrait peut-être s'expliquer par une provenance différente des arbres ou par une répartition différente des températures. *Abies nordmanniana* quant à lui se différencie nettement du Sapin pectiné par un seuil de végétation beaucoup plus élevé.

Les courbes de croissance en fonction des sommes de température présentent une caractéristique commune : la pente de la tangente au point d'inflexion pour une espèce donnée peut être considérée, avec une bonne approximation, comme constante à une condition toutefois, c'est que la croissance ne soit pas extrêmement réduite, comme c'est le cas pour la coupe d'abri. L'influence relative des autres facteurs écologiques (eau et lumière) est alors écrasante et masque le rôle de la température. Il est alors possible d'imaginer que cette caractéristique des courbes de croissance est fonction du genotype. Plus cette constante est élevée et plus les potentialités de croissance en hauteur sont grandes. Les résultats obtenus montrent que *Pseudotsuga menziesii* a la potentialité la plus grande, suivi de *Picea abies* et *Abies alba*, *Abies nordmanniana* aurait la potentialité la plus faible des quatre essences considérées ici.

Bien entendu, au sein de chaque espèce, il serait intéressant de savoir si cette constante varie avec la provenance des arbres. Autre question : cette caractéristique varie-t-elle dans le temps avec l'âge ? Cela semble peu probable. Ce qui varie et nous l'avons constaté, c'est seulement l'ordonnée à l'origine de la tangente au point d'inflexion. L'explication est simple : plus le végétal se trouvera dans de meilleures conditions de croissance, plus la courbe de l'allongement en fonction des sommes de température se rapprochera de la courbe "idéale" de croissance maximum obtenue quand tous les autres facteurs écologiques sont à l'optimum pour l'espèce considérée.

3 - Influences séparées de la lumière et de l'eau

Il est difficile, dans la nature, de séparer l'action de la lumière de celle de l'eau car des variations d'éclairements entraînent des variations des précipitations mais aussi une variation des autres facteurs microclimatiques : température, vent, hygrométrie, pouvoir évaporant de l'air.

Dans notre travail, nous avons dans un premier temps essayé de voir comment variait la croissance en fonction de l'éclairement. Pour cela, nous avons considéré la coupe d'abri, la coupe rase et nous avons "découpé" la clairière en 5 situations : le Nord, le Sud, l'Est, l'Ouest et le Centre. Nous avons calculé la croissance moyenne de chaque espèce dans 7 situations écologiques : la coupe d'abri (C.A), la clairière Nord (C.N), la clairière Sud (C.S), la clairière Est (C.E), la clairière Ouest (C.O), la clairière Centre (C.C) et la coupe rase (C.R). Nous avons pu ainsi étudier la relation qui existait entre la croissance en hauteur et l'éclairement relatif. Le tableau n° 30 donne les valeurs moyennes de l'éclairement relatif en pourcentage de l'éclairement dans la coupe rase.

TABLEAU N° 30 ECLAIREMENT ET POUVOIR EVAPORANT DE L'AIR DANS LES SITUATIONS ECOLOGIQUES OÙ ONT ETE INSTALLEES LES SIX ESPECES DE RESINEUX

Situation	Eclairement en % du plein découvert (1)	Pouvoir évaporant de l'air en % du plein découvert (2)
Coupe d'abri (C.A.)	9	58
Clairière Nord (C.N.)	35	
Clairière Sud (C.S.)	14	
Clairière Est (C.E.)	22	
Clairière Centre (C.C.)	45	62
Clairière Ouest (C.O.)	22	
Plein découvert (P.D.)	100	100

(1) Mesure au luxmètre en été par temps couvert pour la coupe d'abri et calculé à partir des données publiées par ROUSSEL (1962) pour la clairière.

(2) Moyenne mai octobre 1968, mesuré au Piche.

a) Croissance en hauteur

La figure n° 39 montre l'évolution de la croissance en hauteur chez Picea abies. L'examen de cette figure fait apparaître les faits suivants :

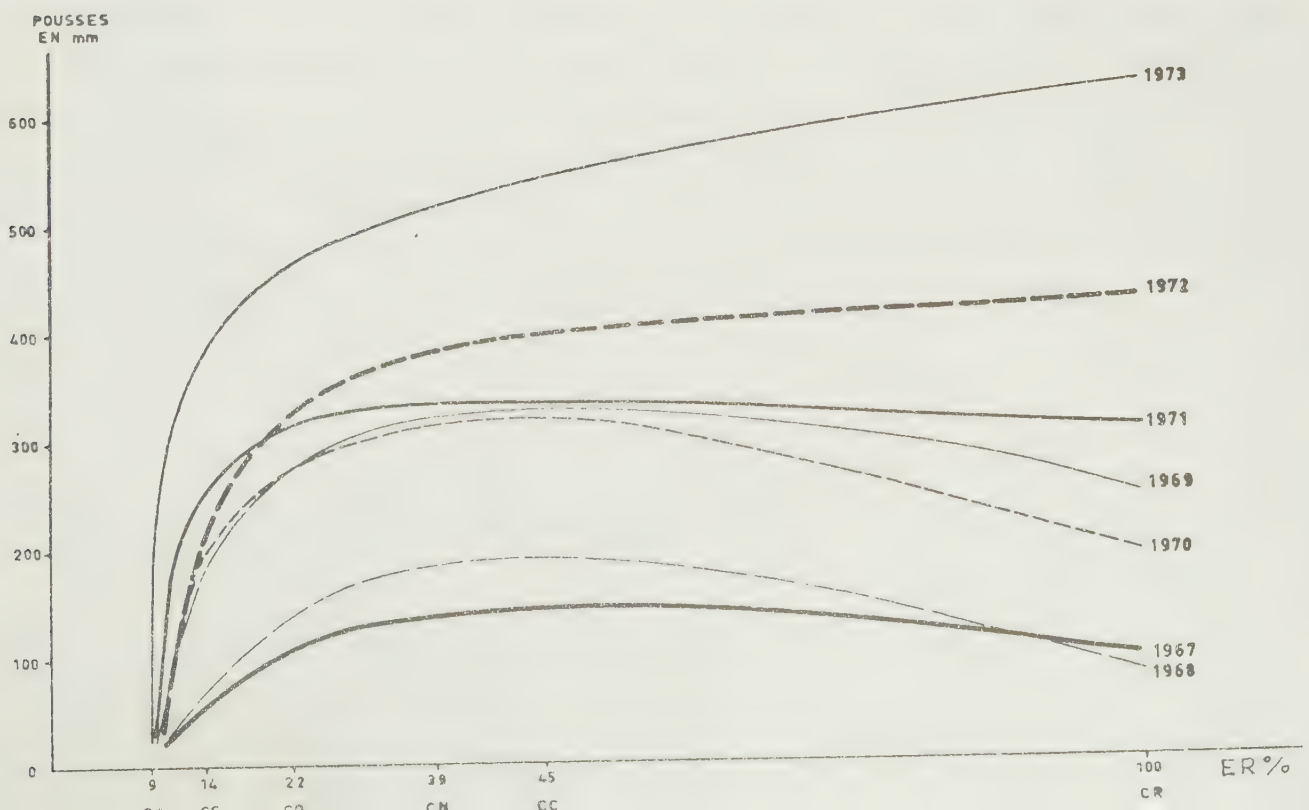
- En 1967, les différences entre les situations écologiques classées par éclairage relatif croissant ne sont pas importantes et souvent pas significatives,

- Dès 1968, il y a un "creusement" des écarts, la croissance est plus importante dans la clairière (Nord, Centre). Ce phénomène se poursuit jusqu'en 1970,

- A partir de 1971, on assiste à un fait nouveau : la croissance dans la coupe rase (100 % E_R) est voisine de celle des stations les plus favorables de la clairière et est même supérieure en 1972 et 1973.

FIGURE 39

VARIATION DE LA LONGUEUR MOYENNE ANNUELLE DE LA POUSSE TERMINALE EN FONCTION DE L'ECLAIREMENT RELATIF (% de l'éclairage en plein découvert) CHEZ PICEA ABIES.



Cette évolution des phénomènes est différente chez les sapins et chez Pseudotsuga menziesii. En effet, il y a un écart entre les situations écologiques : les clairières Nord, Centre, Est et Ouest ont des croissances plus élevées mais ce phénomène persiste jusqu'en 1973. Ainsi que l'on peut le voir sur la figure n° 40, seul l'épicéa a un comportement différent.

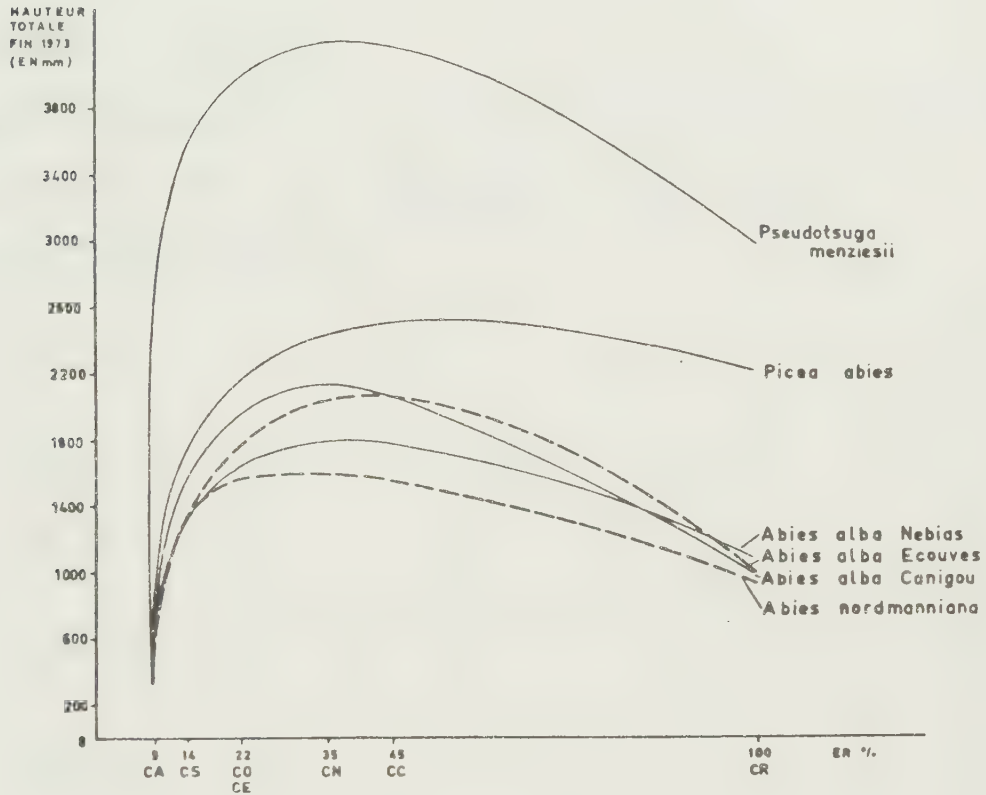
Les résultats obtenus ici doivent être rapprochés de ceux présentés par FAIRBAIRN (1966-1967) et ROUSSEL (1966). Ce dernier écrit que, pour ces espèces, la croissance serait maximum pour des éclaircissements relatifs de l'ordre de 50 % et ceci jusqu'à des âges avancés 15 à 20 ans. A la lumière de nos résultats, plusieurs remarques s'imposent :

- le comportement de l'Epicea est nettement différent des autres espèces étudiées ici et au bout de 4 ans de plantation soit à l'âge de 8 ans, la croissance en hauteur dans la coupe rase (100 % E_R) devient la plus importante.

- nous avons dit au début de ce paragraphe que lorsqu'on faisait varier l'éclaircissement en condition naturelle, on faisait varier ipso facto d'autres facteurs et particulièrement le facteur eau. Il est donc finalement intéressant de se demander quel est le rôle exact de l'eau. Dans cette idée, nous avons réalisé une expérimentation complémentaire. Nous avons cultivé (AUSSENAC 1973) en cases de végétation, 3 espèces : Abies alba, Picea abies et Pseudotsuga menziesii. Ces cases étaient installées dans les 3 situations écologiques suivantes : coupe rase, coupe d'abri et clairière nord. Elles fonctionnaient en évapotranspiromètre, c'est-à-dire que nous avons maintenu constamment l'humidité du sol à la capacité au champ de façon que les plants puissent disposer des quantités d'eau nécessaires pour satisfaire la demande de l'évapotranspiration potentielle. (Photographie n° 9 - Annexe).

FIGURE 40

- a) VARIATION DE LA HAUTEUR TOTALE MOYENNE (fin 1973)
DES PLANTS EN FONCTION DE L'ECLAIREMENT RELATIF(ER)
CHEZ LES ESPECES ETUDIEES.



- b) VARIATION DE LA POUSSE MOYENNE EN 1973 EN FONCTION
DE L'ECLAIREMENT RELATIF (ER) CHEZ LES ESPECES
ETUDIEES.

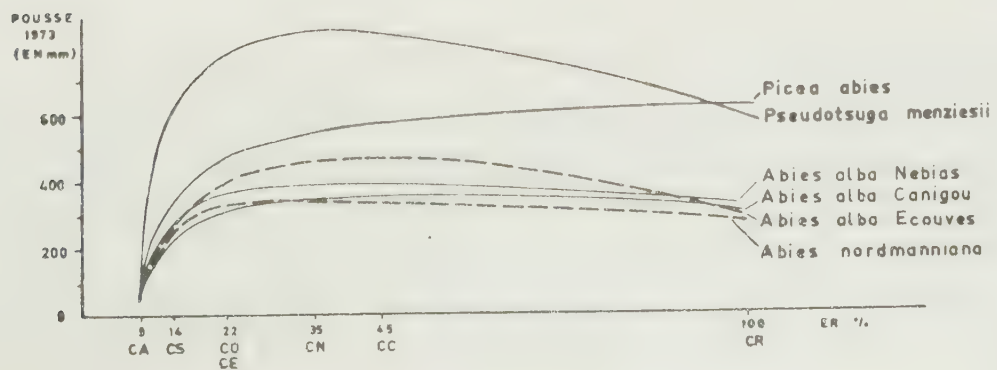


TABLEAU N° 31

ETUDE COMPARATIVE EN CASE DE VEGETATION DE LA CROISSANCE
EN HAUTEUR (MM) CHEZ ABIES ALBA, PICEA ABIES ET
PSEUDOTSUGA MENZIESII

Espèce	Année	Coupe rase	Coupe d'abri	Clairière Nord
Abies alba	1972	89	41	86
	1973	202	49	67
	1969	98	95	98
Picea abies	1970	166	41	132
	1971	196	24	155
	1972	217	114	190
Pseudotsuga menziesii	1973	193	74	131

Le tableau n° 31 donne les résultats obtenus dans cette expérimentation. Il apparaît de façon très claire que pour les 3 espèces étudiées, la croissance en hauteur a été maximale (différences significatives) dans la situation de coupe rase. Il s'agit là d'un résultat particulièrement intéressant car il nous montre le rôle relatif des facteurs eau et lumière. Pour les espèces étudiées, en conditions naturelles, la croissance en hauteur est la plus

élevée pour des éclaircissements relatifs voisins de 50 - 60 %. Ce résultat n'est pas le fait de l'action spécifique de la lumière mais de la difficulté qu'ont les jeunes arbres à satisfaire leurs besoins en eau (équilibre ETP/ETR).

b) Croissance en diamètre

La figure n° 41 montre, à titre d'exemple, la variation du diamètre en fonction de l'éclaircissement relatif et de l'année chez Abies nordmanniana, Picea abies et Pseudotsuga menziesii. On retrouve ici la même évolution que dans le cas de la croissance en hauteur. Picea abies se distingue ici aussi très nettement des autres espèces.

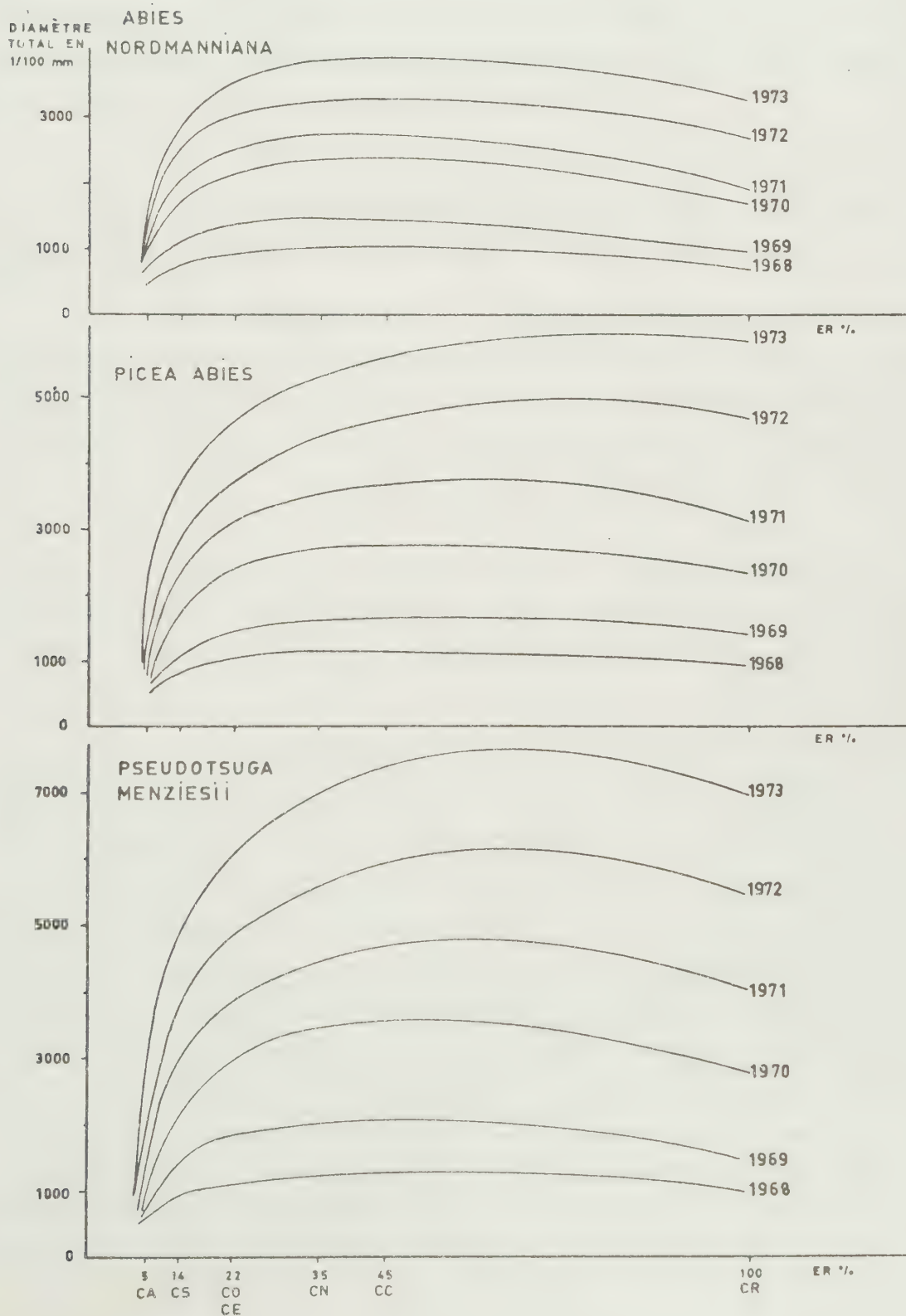
L'expérimentation que nous avons entreprise en cases de végétation, indique que, quand l'alimentation en eau est optimale, la croissance en diamètre (*tableau n° 32*) augmente avec l'éclaircissement et est maximum pour 100 % E_R .

TABLEAU N° 32

ETUDE COMPARATIVE EN CASE DE VEGETATION DE L'ACCROISSEMENT EN DIAMETRE (MM) CHEZ ABIES ALBA, PICEA ABIES ET PSEUDOTSUGA MENZIESII.

Espèce	Période	Coupe rase	Coupe d'abri	Clairière Nord
<u>Abies alba</u>	1971 - 1973	11,40	0,60	4,10
<u>Picea abies</u>	1968 - 1971	11,00	0,70	5,50
<u>Pseudotsuga menziesii</u>	1971 - 1973	11,40	1,80	4,10

FIGURE 41
VARIATION DU DIAMETRE MOYEN ANNUEL EN FONCTION DE
L'ECLAIREMENT RELATIF CHEZ ABIES NORDMANNIANA,
CHEZ PICEA ABIES,
CHEZ PSEUDOTSUGA MENZIESII.



c) Conclusions

Les résultats que nous avons obtenus ici montrent clairement l'influence du microclimat sur la croissance. L'étude de l'influence globale des facteurs microclimatiques est nécessaire à une bonne compréhension de la réponse des arbres.

Ainsi, dans notre expérimentation que constatons-nous ? :

- Une croissance en hauteur importante dans la clairière, moindre dans la coupe rase et très faible dans la coupe d'abri.

Dans un premier temps, on pourrait interpréter ce résultat comme résultant uniquement de l'influence de l'éclairement et dire que "ces espèces résineuses sont des espèces d'ombre qui ne peuvent supporter un éclaircissement élevé dans le jeune âge". En réalité, l'analyse microclimatique que nous avons effectué (*voir première partie*) et les expérimentations que nous avons réalisées en cases de végétation, nous montrent que :

- dans le très jeune âge, dans notre cas, les premières années après plantation, les arbres ont des difficultés pour leur alimentation hydrique (probablement système racinaire insuffisamment développé et manquant d'efficacité). En conséquence, leur croissance sera la plus forte dans les stations où les conditions d'alimentation hydrique seront les plus favorables. Ces conditions favorables reposent à la fois sur une bonne alimentation en eau du sol et sur un pouvoir évaporant de l'air modéré (ETP faible). Elles existent dans la nature en relation avec des couverts forestiers plus ou moins importants (*voir première partie*) : d'où la complexité des notions d'ombre et de lumière. Dans notre travail, nous avons donné les caractéristiques microclimatiques des 3 milieux types : coupe d'abri, coupe rase et clairière. La coupe d'abri se caractérise à la fois par un éclaircissement relatif faible (9 %), un pouvoir évaporant faible (58 %) et des profils hydriques défavorables pour les jeunes plants par suite de la concurrence et de l'interception des précipitations des arbres de la strate dominante. Dans cette situation, les conditions de croissance sont particulièrement défavorables ; mais le facteur réellement limitant est dans ce cas l'éclaircissement ainsi que le démontre l'expérimentation en cases de végétation.

La coupe rase de son côté présente des conditions d'éclairement bien entendu beaucoup plus favorable mais le pouvoir évaporant de l'air est aussi très élevé et bien que l'alimentation en eau du sol soit meilleure que dans la coupe d'abri, il en résulte pour les jeunes arbres, dans les premières années après la plantation, des déséquilibres hydriques qui retentissent défavorablement sur la croissance.

La clairière enfin a présenté pour les premières années après la plantation les meilleures conditions de croissance (1) :

- alimentation hydrique du sol satisfaisante (interception faible voir première partie),

- ETP abaissé par rapport à la coupe rase. BOYER (1964) a montré que le taux de photosynthèse était corrélé au déficit de pression de diffusion dans la plante. Ce dernier reflète l'état d'équilibre du complexe sol, arbre, atmosphère. Les études que nous avons menées (AUSSENAC et al 1971), nous ont montré qu'il existe une relation étroite entre la pression de sève et le potentiel de l'eau dans l'air et dans le sol. Divers auteurs ont d'ailleurs étudié l'évolution de la photosynthèse nette en fonction de l'état de sécheresse du sol. HODGES (1968) a montré que la photosynthèse nette baissait rapidement chez Abies grandis quand l'humidité relative de l'air passait de 96 % à 45 %.

Les résultats de l'expérimentation de terrain montrent cependant qu'il s'agit d'un état temporaire. Dès que l'alimentation hydrique devient correcte, le facteur limitant alors est la lumière. A ce moment là, la croissance dans la coupe rase est supérieure à celle de la clairière. L'expérimentation en case de végétation recoupe et affine cette information en démontrant que même dès le début de la plantation ou d'une façon générale, dès la germination, si l'alimentation hydrique est satisfaisante, c'est la lumière qui est le facteur déterminant. Nous examinerons dans le chapitre V les conséquences de ces résultats pour l'écophysiologie des espèces étudiées ici.

(1) Dans cette partie du travail, nous n'avons pas pris en compte l'étude des conséquences des accidents climatiques (gelées tardives) que nous envisagerons dans les conséquences sylvicoles.

IV. L'APPAREIL FOLIAIRE

Le développement et la croissance des jeunes plants des différentes espèces et provenances que nous avons étudié, est fortement influencé ainsi que nous l'avons montré précédemment par le microclimat.

En fait, c'est toute la biologie qui est affectée par les conditions microclimatiques (ROUSSEL 1972, AUSSENAC, 1973). Ces influences sont particulièrement intéressantes à étudier au niveau de l'appareil foliaire qui est le siège de phénomènes de transpiration et de photosynthèse responsables en partie, de la croissance de l'arbre. D'une façon générale, on parle de feuille d'ombre et de feuille de lumière (PERRIN, 1963). Dans les conditions naturelles il y a interaction des facteurs microclimatiques et toute variation de l'intensité lumineuse affecte d'autres facteurs tels la température et le pouvoir évaporant de l'air. Ainsi, il est difficile d'attribuer uniquement au facteur lumière les variations morphologiques et anatomiques de l'appareil foliaire. L'organisation de l'appareil foliaire dans un contexte microclimatique déterminé dépend du génotype. Elle est ainsi en partie responsable de la croissance de l'arbre. Il est alors intéressant d'analyser le niveau d'adaptation de l'appareil foliaire des différentes espèces dont nous avons déjà étudié la croissance.

Cette étude aurait pu être entreprise en laboratoire, dans des chambres climatisées. Ce type d'installation permet de séparer l'action des différents facteurs climatiques ; mais il est ensuite difficile d'interpréter correctement les cas concrets observés sur le terrain car il n'est pas facile de reconstituer véritablement les conditions microclimatiques naturelles. Nous avons préféré travailler directement en forêt. Dans les chapitres précédents (*première partie*) nous avons montré que la nature et la structure du couvert influençaient les facteurs climatiques en créant des microclimats particuliers. Ainsi par l'utilisation raisonnée de la sylviculture, nous avons pu réaliser dans la nature, des expérimentations du type de celles que nous aurions pu envisager au laboratoire.

A. METHODES D'ETUDE

Le travail a donc porté sur les espèces et provenances étudiées au chapitre précédent (*voir tableau n° 22*).

Nous avons considéré 7 milieux différents : la coupe rase, la coupe d'abri, la clairière Nord, la clairière Sud, la clairière Est, la clairière Ouest et la clairière Centre. Ainsi que nous l'avons montré précédemment, ces traitements diffèrent essentiellement par le microclimat lumineux et le pouvoir évaporant de l'air (*tableau n° 29*).

L'étude des feuilles n'a porté que sur un échantillon de l'appareil foliaire. Après étude de l'importance de la variabilité individuelle nous avons, pour chaque espèce et pour chacun des milieux considérés, choisis au hasard 5 arbres sur lesquels nous avons prélevé 20 aiguilles âgées de 1 an. Ces aiguilles sont très actives et très importantes pour les phénomènes de photosynthèse et de transpiration. On sait en effet que l'activité photosynthétique décline avec leur âge (FREELAND, 1952). Ces aiguilles échantillons ont été prélevés sur le deuxième verticille à partir du sommet des arbres afin d'éviter les effets d'ombrages qui auraient pu se produire si elles avaient été choisies dans le bas de la couronne. Les études ont alors consisté en mensurations, coupes avec analyse anatomique, comptage et mesure des stomates. Les coupes ont été effectuées au milieu des aiguilles; le colorant utilisé est le carmino vert de Mirande.

Le comptage et la mesure des stomates ont été fait à partir de photographies réalisées avec un épimicroscope ZEISS. Les photographies sont ensuite projetées et examinées sur grand écran.

Afin d'améliorer la connaissance de la morphologie globale de l'arbre, nous avons voulu étudier également l'angle d'insertion sur la tige des branches du premier verticille. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un rapporteur modifié et adapté pour permettre le travail sur le terrain.

B. EFFET DU MICROCLIMAT SUR LA MORPHOLOGIE DES AIGUILLES

1 - Sur les dimensions et la forme des aiguilles

Les dimensions des aiguilles des 5 espèces ou provenances ont été étudiées dans les 7 situations écologiques retenues. La morphologie des aiguilles peut être définie valablement à l'aide de 3 paramètres de base : la longueur (L), la largeur (l), et l'épaisseur (E). Pour Picea abies, ce sont les diagonales D et d de la section de l'aiguille qui sont retenues. Les rapports de ces paramètres entre eux permettent aussi d'améliorer la définition de la morphologie des aiguilles (*Figure n° 42*). Les figures n° 43 et 44 donnent les différentes valeurs obtenues et les classements respectifs des stations étudiées.

- La longueur des aiguilles

Chez Abies alba, la longueur des aiguilles est la plus courte dans les traitements de plein découvert (P.D.) et de coupe d'abri (C.A.) pour les deux provenances. (Les traits verticaux des figures joignent les stations qui ne sont pas statistiquement différentes au seuil $P = 0,05$). Les aiguilles des différentes stations de la clairière sont d'une façon générale plus longues. Pour l'ensemble, les valeurs s'étagent de 25,3 mm (C.E.) à 18,3 mm (P.D.), pour Abies alba Ecouves II, et de 25,0 mm (C.N.) à 15,8 mm (P.D.) pour Abies alba Canigou.

Chez Abies nordmanniana, les résultats sont un peu différents. Cependant ici aussi, les aiguilles des plants poussant en plein découvert sont les plus courtes. Les longueurs s'étagent entre 28,1 mm (C.C.) et 20,3 mm (P.D.). Ici encore, les différences entre les aiguilles de la coupe d'abri et celles du plein découvert ne sont pas significatives au seuil de probabilité choisi ($P = 0,05$).

Dans le cas de Pseudotsuga menziesii, ce sont les aiguilles des arbres poussant dans la coupe d'abri (C.A.) qui sont les plus courtes. La différence avec les autres situations est statistiquement significative.

FIGURE 42

COUPE SCHEMATIQUE D'UNE AIGUILLE DE SAPIN PECTINE
ET D'UNE AIGUILLE D'EPICEA COMMUN.

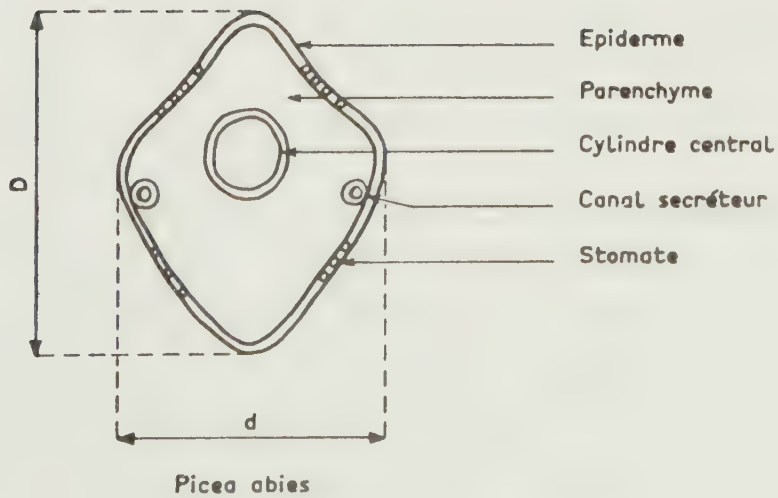
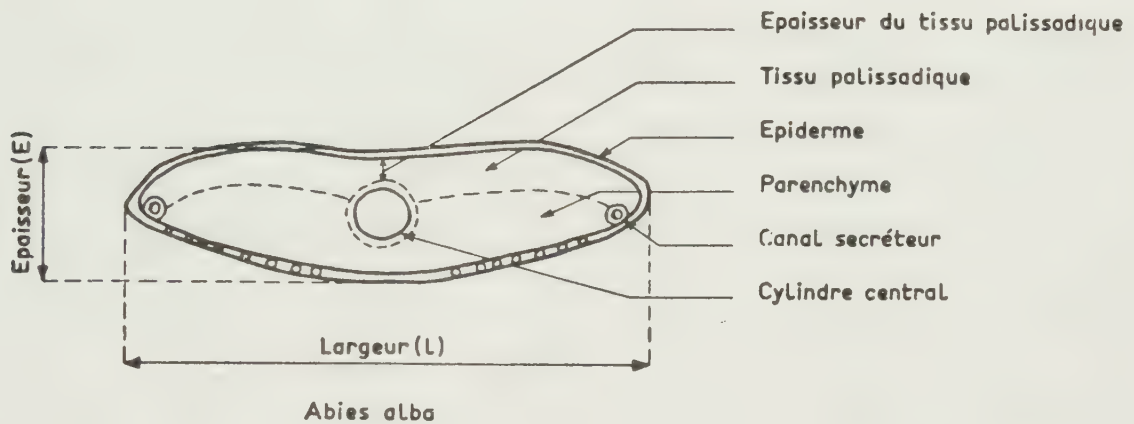
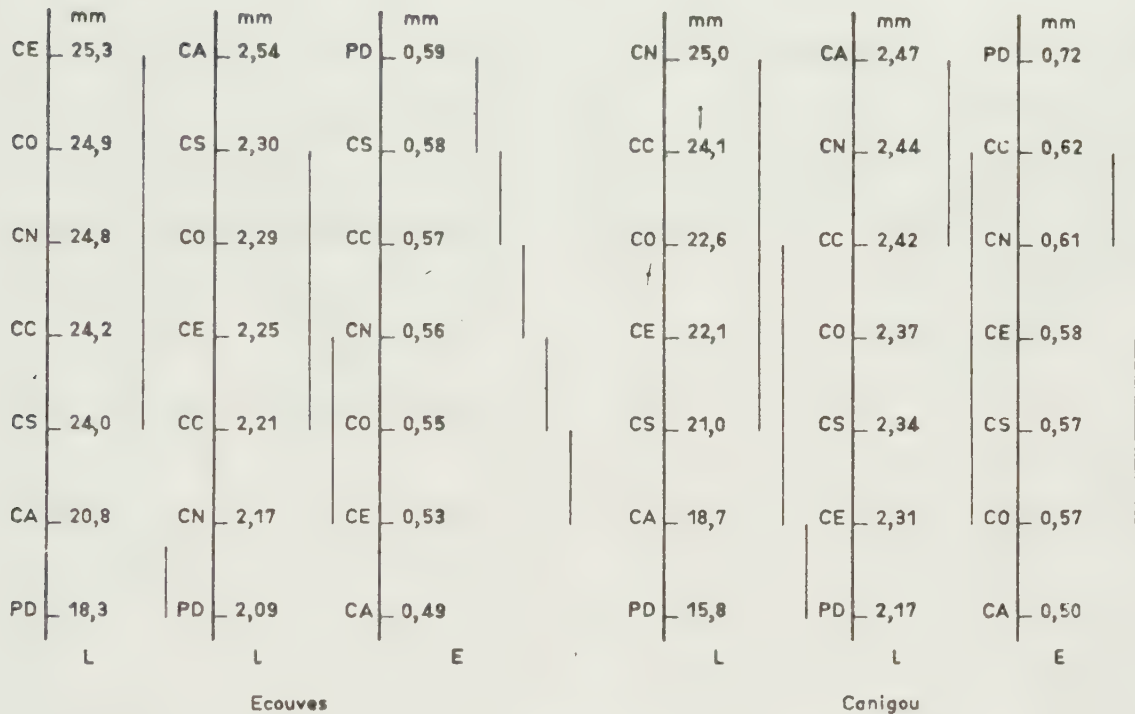
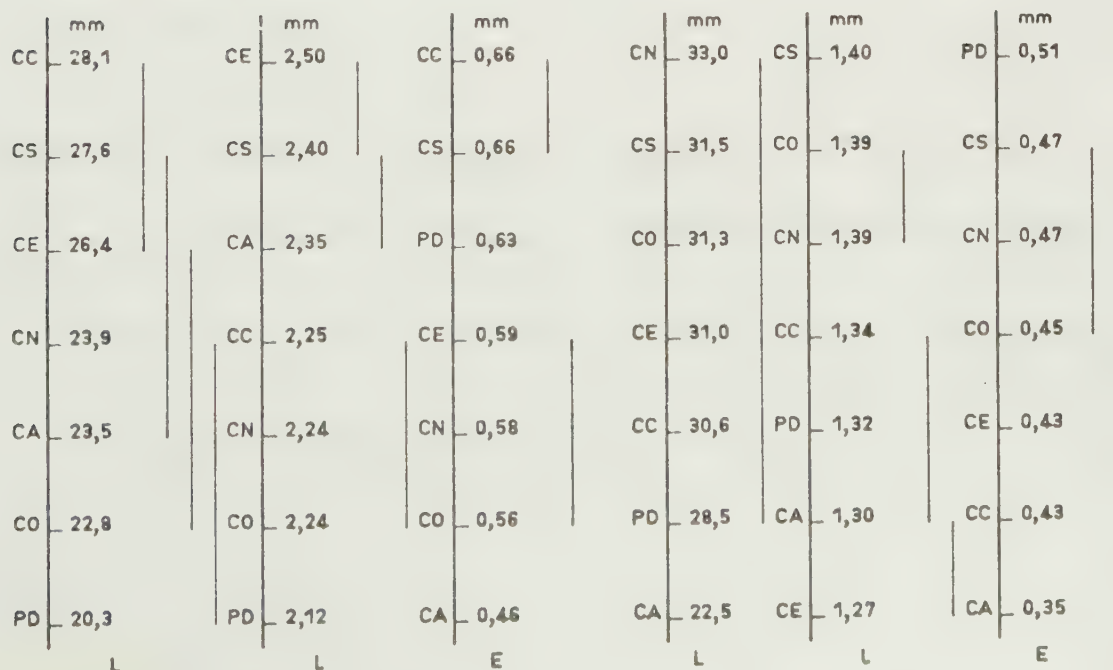


FIGURE 43

CLASSEMENT DES DIFFERENTS MILIEUX ETUDIES POUR LES
CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES AIGUILLES

(L : longueur; l : largeur; E : épaisseur;)

CHEZ ABIES ALBA, ABIES NORDMANNIANA ET PSEUDOTSUGAMENZIESII. (C.C. clairière centre; C.S. clairière
sud; C.E. clairière est; C.O. clairière
ouest; C.N. clairière nord; C.A. coupe
d'abri; P.D. plein découvert;).*Abies alba**Abies nordmanniana**Pseudotsuga menziesii*

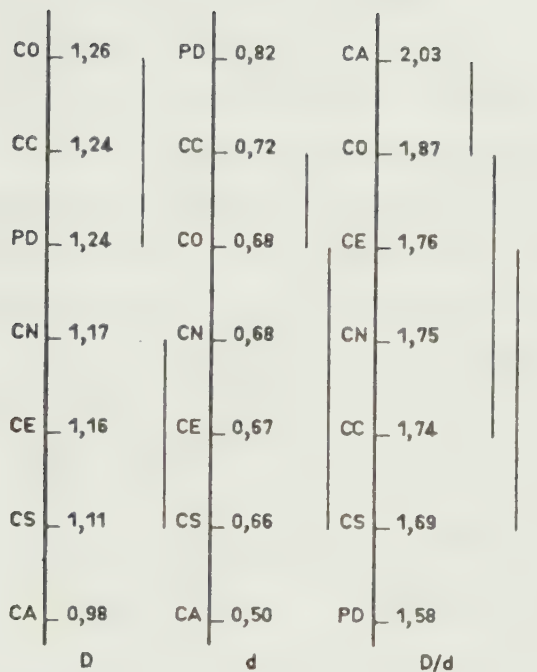


FIGURE 44

CLASSEMENT DES DIFFERENTS MILIEUX ETUDIES POUR LES CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES AIGUILLES.

(D : grande diagonale
d : petite diagonale)

CHEZ PICEA ABIES.

Picea abies

Les aiguilles du plein découvert sont moins longues que celles des différentes stations de la clairière, mais les différences ne sont pas significatives. Pour l semble, les longueurs vont de 33,0 mm (C.N.) à 22,5 mm (C.A.).

- La largeur des aiguilles

Chez Abies alba, en ce qui concerne la largeur (*figures n° 43 et 44*), les aiguilles des deux provenances sont les plus larges dans la coupe d'abri (2,54 mm Abies alba Ecouves II, 2,47 mm Abies alba Canigou) et les plus étroites dans le plein découvert (2,09 mm Abies alba Ecouves II, 2,17 mm Abies alba Canigou). Les aiguilles des plants des différentes stations de la clairière ont une position intermédiaire.

Chez Abies nordmanniana, on note une différence : les aiguilles les plus larges se rencontrent non plus dans la coupe d'abri, mais dans l'Est de la clairière (C.E) (2,5 mm). Les aiguilles les plus étroites sont celles du plein découvert (2,12 mm).

Dans le cas du Pseudotsuga menziesii, les choses sont très différentes puisque ce ne sont ni les aiguilles de coupe d'abri qui sont les plus larges, ni les aiguilles du plein découvert qui sont les plus étroites. Ce sont les différentes stations de la clairière qui convrent l'ensemble de la variation, des valeurs les plus élevées (C.S : 1,40 mm) au plus petites (C.E : 1,27 mm). Ainsi, le Douglas apparaît ici très différent du Sapin pectiné et du Sapin de Nordmann.

$$\text{. Le rapport } \frac{\text{longueur des aiguilles (L)}}{\text{largeur des aiguilles (l)}}$$

Le rapport $\frac{L}{l}$ varie selon les cas (figure n° 45). Il est d'une façon générale plus faible dans la coupe d'abri et le plein découvert que dans les différentes stations de la clairière qui ont donc des aiguilles proportionnellement plus longues.

Ce rapport varie avec l'éclairement relatif et passe par un maximum dans la clairière (figure n° 45).

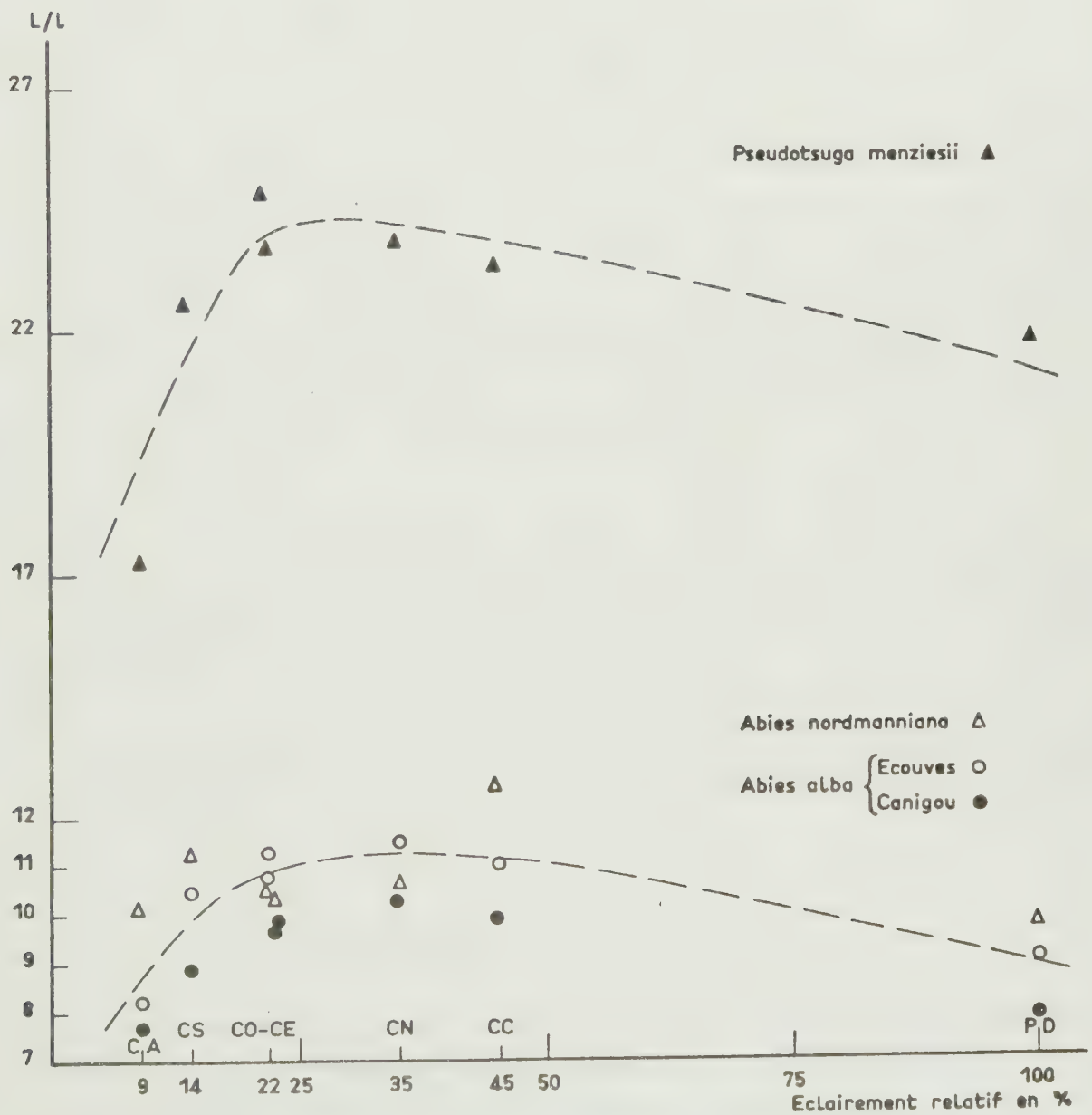
. L'épaisseur des aiguilles

Chez Abies alba, les aiguilles sont les plus épaisses dans le plein découvert et les moins épaisses dans la coupe d'abri pour les deux provenances, il en est de même pour Pseudotsuga menziesii (figures n° 43 et 44). Pour Abies nordmanniana, les aiguilles de la coupe d'abri sont aussi les moins épaisses, mais ce sont les aiguilles du centre de la clairière qui ont la plus grande épaisseur.

Picea abies présente (figure n° 42) des aiguilles dont la section est sensiblement un losange. Les mesures de la grande diagonale (D) et de la petite diagonale (d), sont données par la figure n° 44. C'est dans la

FIGURE 45

VARIATION DU RAPPORT L/l (longueur)/ l (largeur) EN
FONCTION DE L'ECLAIREMENT RELATIF CHEZ ABIES ALBA,
ABIES NORDMANNIANA, PSEUDOTSUGA MENZIESII.



coupe d'abri (C.A) que l'on trouve simultanément les dimensions les plus faibles ($D : 0,98 \text{ mm}$, $d : 0,50 \text{ mm}$). Les valeurs les plus élevées se rencontrent dans la partie Ouest de la clairière (C.O), pour la grande diagonale ($D : 1,26 \text{ mm}$) et dans le plein découvert (P.D.) pour la petite diagonale ($0,82 \text{ mm}$). Le rapport $\frac{D}{d}$ qui donne une bonne idée de la forme de la section de l'aiguille est le plus faible (1,58) dans le plein découvert et le plus grand dans la coupe d'abri (2,03).

$$- \text{ Le rapport } \frac{\text{largeur des aiguilles (l)}}{\text{épaisseur des aiguilles (E)}}$$

Chez les autres résineux étudiés, le rapport largeur/épaisseur $\frac{l}{E}$ permet de préciser la forme de la section des aiguilles. Il est le plus élevé dans la coupe d'abri et le plus faible dans le plein découvert pour les 4 espèces ou provenances (figure n° 46). Les aiguilles sont aplaties dans la coupe d'abri et "globuleuses" dans le plein découvert, ainsi que le montrent les photographies n° 10. Les aiguilles des différentes stations de la clairière ont une forme intermédiaire.

Le rapport $\frac{l}{E}$ décroît depuis les éclaircissements relatifs faibles (coupe d'abri) jusqu'aux éclaircissements les plus forts. Il en est de même de $\frac{D}{d}$ pour l'Epicea (figure n° 46).

Il y a donc une relation étroite entre la forme des aiguilles et le niveau d'énergie reçu. Quand l'éclaircissement est faible, les aiguilles sont aplaties.

2 - Sur le nombre et la dimension des stomates

Les stomates constituent les voies privilégiées par lesquelles s'effectuent les échanges gazeux (H_2O et CO_2) qui conditionnent la vie de l'arbre. Leurs nombres et leurs dimensions peuvent révéler des adaptations particulières aux différentes conditions microclimatiques.

FIGURE 46

VARIATION DU RAPPORT L/E (longueur) / E (épaisseur) ET D/d (grande diagonale) / d (petite diagonale) EN FONCTION DE L'ECLAIREMENT RELATIF CHEZ ABIES ALBA, ABIES NORDMANNIANA, PICEA ABIES ET PSEUDOTSUGA MENZIESII.

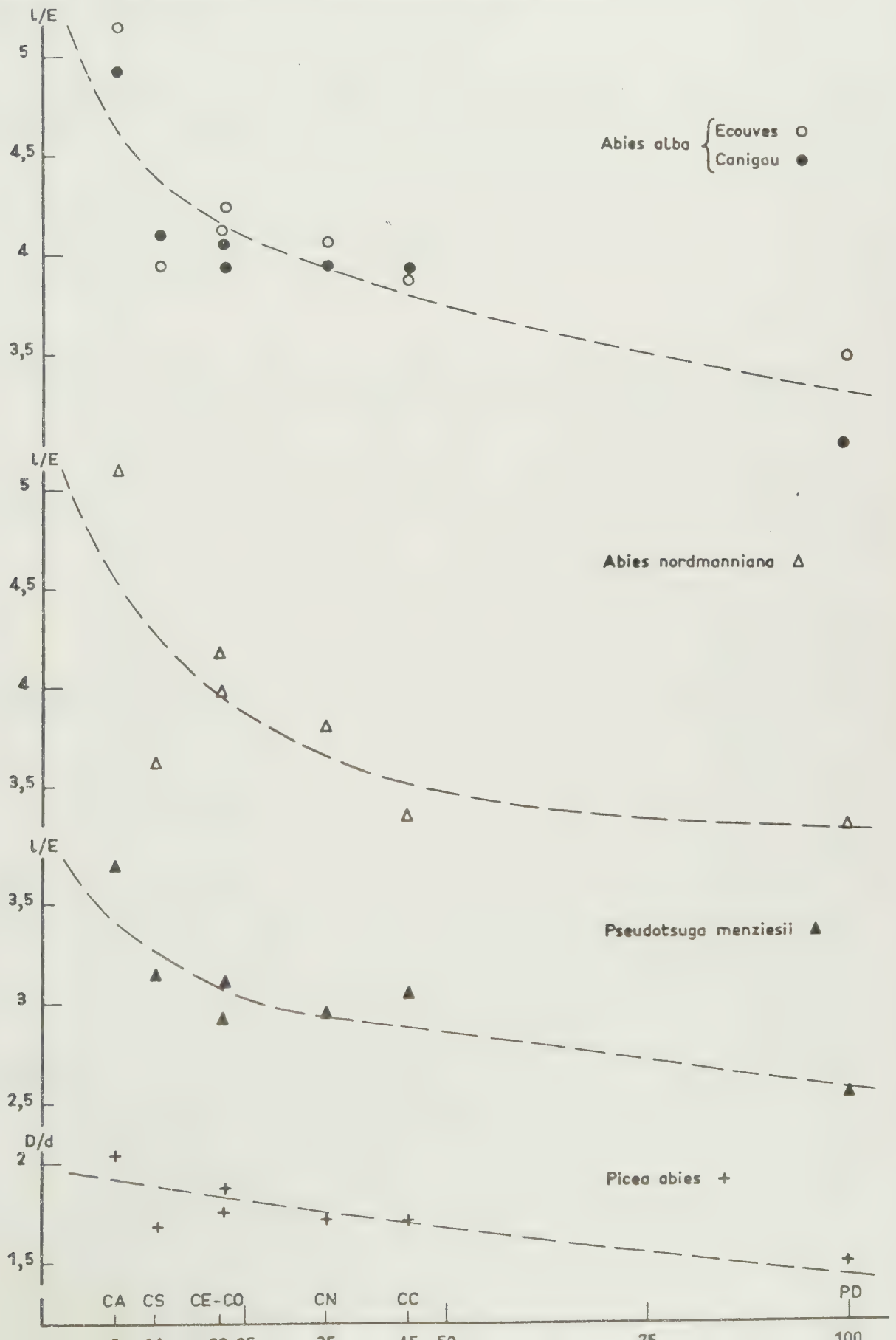


TABLEAU N° 33

EFFET DU TRAITEMENT SUR LE NOMBRE DE STOMATES, LA LARGEUR DES BANDES STOMATIQUES ET LE NOMBRE DE FILES DE STOMATES.

Test de signification * significatif à 0,05

*** significatif à 0,01

(1) D.L. nombre de degrés de liberté (2) par 1/2 aiguille

N.S. non significatif

[illegible]

Le tableau n° 33 donne les valeurs obtenues pour les différents paramètres étudiés (nombre de stomates/mm² de surfaces des bandes stomatiques, nombre de stomates/mm² de surface foliaire, largeur des bandes stomatiques, nombre de files de stomates).

Le nombre de stomates par mm² de surface foliaire varie de 60 à 80 chez Abies alba Ecouves II, de 62 à 78 chez Abies alba Canigou, de 63 à 86 chez Abies nordmanniana et de 110 à 142 chez Pseudotsuga menziesii. Ainsi que l'indique le tableau n° 33, les effets traitements ne sont pas toujours significatifs.

. la dimension des stomates

Les dimensions des stomates ont aussi été évaluées. L'analyse de variance montre que l'effet traitement n'est significatif pour aucune des espèces étudiées (*voir tableau n° 34*). Chez les trois sapins étudiés, ces dimensions sont voisines. Le rapport $\frac{\text{longueur des stomates}}{\text{largeur des stomates}}$ montre qu'en moyenne les stomates d'Abies alba Ecouves et Abies nordmanniana sont plus arrondis que ceux d'Abies alba Canigou.

Les dimensions des stomates de Pseudotsuga menziesii sont nettement inférieures à celles des Sapins.

TABLEAU N° 34 EFFET DU TRAITEMENT SUR LES DIMENSIONS
EN MICRONS DES STOMATES.

ESPECE	PARAMETRE	C.A.	C.N.	C.S.	C.E.	C.CJ	C.O.	P.D.
<u>Abies alba</u> Ecouves II	Longueur (L)	75,7	76,9	77,3	78,1	73,9	78,1	71,2
	Largeur (l)	50,1	49,5	51,9	50,4	52,4	51,0	49,5
<u>Abies alba</u> Canigou	Longueur	72,5	77,6	77,7	80,0	82,4	81,1	73,1
	Largeur	56,5	56,7	55,2	58,7	58,5	61,0	52,6
<u>Abies</u> <u>Nordmanniana</u>	Longueur	73,0	78,9	75,2	79,4	74,4	78,3	75,8
	Largeur	49,2	57,9	54,6	54,8	54,9	56,1	52,9
<u>Pseudotsuga</u> <u>menziesii</u>	Longueur	49,2	47,7	48,4	51,0	47,1	47,7	49,7
	Largeur	30,9	32,1	32,5	33,4	34,8	31,6	37,3

C. EFFET SUR LA STRUCTURE DES AIGUILLES

L'étude a porté sur l'ensemble des tissus, mais n'ont été retenus ici que les caractères intéressants au regard de leurs réactions aux variations microclimatiques. L'épaisseur du tissu palissadique (t_p) a été mesurée au niveau du cylindre central (tableau n° 35). L'analyse statistique a montré que chez toutes les espèces étudiées ici, l'effet traitement était significatif au seuil de $P = 0,05$. Chez Abies alba (Ecouves II et Canigou) et Pseudotsuga menziesii, l'épaisseur du tissu palissadique est la plus importante dans le plein découvert et la plus faible dans la coupe d'abri. Dans l'ensemble, ce tissu apparaît plus épais chez le Sapin pectiné (Canigou) que chez Abies alba (Ecouves II). Chez Abies nordmanniana, le tissu palissadique est plus épais que dans le Centre de la clairière (C.C). Le rapport épaisseur aiguille (E)/épaisseur tissu palissadique (t_p) (tableau n° 35) est d'une façon générale le plus fort dans la coupe d'abri, ce qui signifie que pour des aiguilles d'épaisseur égale, le tissu palissadique est moins épais. Le cylindre central a un diamètre variable (tableau n° 35), mais qui est toujours le plus faible dans la coupe d'abri.

Le diamètre des canaux résinifères est, d'une façon générale, plus petit dans la coupe d'abri (tableau n° 35). D'autres caractères anatomiques ont été analysés, mais il n'était pas possible d'effectuer à partir d'eux une étude biométrique correcte compte-tenu de l'importance de l'échantillon nécessaire.

D. EFFET DU MICROCLIMAT SUR L'ANGLE D'INSERTION DES BRANCHES

Nous n'avons ici considéré que 3 milieux : la coupe rase, la coupe d'abri et la clairière, en regroupant pour cette dernière l'ensemble des situations Nord, Sud, Est, Ouest et Centre. Le tableau n° 36 donne les résultats obtenus. On remarque que d'une façon générale l'angle d'insertion des branches augmente de la coupe rase à la clairière et à la coupe d'abri.

TABLEAU N° 35

EPAISSEUR MOYENNE DU TISSU PALISSADIQUE (t_p), RAPPORT : EPAISSEUR DE L'AIGUILLE (E) / EPAISSEUR DU TISSU PALISSADIQUE. DIAMÈTRE MOYEN DU CYLINDRE CENTRAL ET DES CANAUX RÉSINIFÈRES.

ESPECE	PARAMETRE	C.A.	C.N.	C.S.	C.E.	C.C.	C.O.	P.D.
<u>Abies alba</u> Ecouvies II	Epaisseur (μ) tissu palissadique (t_p)	94,8	117,9	134,5	131,7	134,9	122,5	141,3
	E/ t_p	5,1	4,6	4,4	4,0	4,2	4,1	4,2
	Diamètre cylindre central (μ)	167,9	198,8	194,2	187,1	193,1	183,9	187,1
	Diamètre canaux résinifères (μ)	82,7	89,8	90,2	84,8	83,8	85,6	88,0
<u>Abies alba</u> Canigou	Epaisseur (μ) tissu palissadique (t_p)	109,3	167,2	145,9	139,5	163,3	142,4	204,8
	E/ t_p	4,6	3,7	3,9	4,1	3,8	4,0	3,5
	Diamètre cylindre central (μ)	175,0	200,2	188,9	192,8	205,9	194,9	186,0
	Diamètre canaux résinifères (μ)	74,2	94,1	90,2	90,5	90,9	95,9	87,0
<u>Abies</u> <u>Nordmanniana</u>	Epaisseur (μ) tissu palissadique (t_p)	89,5	159,4	171,1	156,6	202,4	138,1	160,5
	E/ t_p	5,1	3,7	3,9	3,8	3,3	4,0	3,9
	Diamètre cylindre central (μ)	176,1	202,0	218,3	212,3	220,1	194,2	205,5
	Diamètre canaux résinifères (μ)	78,1	81,3	95,5	79,2	86,3	81,7	85,2
<u>Pseudotsuga</u> <u>menziesii</u>	Epaisseur (μ) tissu palissadique (t_p)	82,4	126,7	111,8	115,4	99,4	96,6	145,2
	E/ t_p	4,3	3,7	4,2	3,7	4,3	4,6	3,5
	Diamètre cylindre central (μ)	128,2	176,8	178,2	161,9	170,4	172,5	186,7
	Diamètre canaux résinifères (μ)	22,7	43,7	51,1	40,8	41,5	45,1	55,0

Ainsi, dans ce dernier milieu, les branches se rapprochent le plus de la position horizontale. Dans les deux premières situations (coupe rase et clairière), les branches sont davantage redressées. Les écarts sont faibles entre ces deux milieux. Il est probable d'ailleurs qu'il existe des différences entre les différentes situations de la clairière.

TABLEAU N° 36

COMPARAISON DE L'ANGLE D'INSERTION (EN DEGRES) DES BRANCHES DU 1^{ER} VERTICULE POUR DIFFERENTES ESPECES DANS LES MILIEUX ETUDIES .

Situation	<u>Abies alba</u> Ecouvès	<u>Abies alba</u> Canigou	<u>Abies alba</u> Nebias	<u>Abies</u> Nordmanniana	<u>Picea abies</u>	<u>Pseudotsuga</u> <u>menziesii</u>
Coupe d'abri	74 + 8°	77 + 9°	77 + 12°	76 + 8°	72 + 13°	69 + 11°
Clairière	67 + 1°	71 + 3°	69 + 4°	71 + 3°	60 + 1°	58 0°
Coupe rase	66	68	65	68	59	58

* Les chiffres avec astérisques (°) donnent l'écart à la coupe rase.

D'une façon générale, on peut dire que ce sont les sapins qui, dans les 3 milieux considérés, ont les angles d'insertion les plus grands. Il peut alors en résulter pour eux un avantage dans la coupe d'abri : milieu où le niveau d'énergie est faible, et un désavantage dans la coupe rase où l'éclairement est au contraire très fort.

Il est probable qu'il existe également une influence du microclimat sur la position de l'aiguille. Nous ne l'avons pas étudié. Cependant, les observations effectuées dans notre expérimentation nous montrent que dans la coupe d'abri, l'ensemble des aiguilles tend à se développer sur un seul plan à tel point que par exemple Abies nordmanianna ne présente plus dans ce traitement ses rameaux typiques en "écouvillon", mais au contraire des rameaux "pectinés". La résultante des deux phénomènes donne une position de l'aiguille qui reflète, avec les caractères anatomiques et morphologiques, l'adaptation de l'espèce aux conditions microclimatiques dans lesquelles elle se développe.

E. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Dans l'ensemble, il apparaît qu'il y a un effet significatif du microclimat sur la forme et la structure des aiguilles (1). Cependant, il existe une grande variabilité au niveau des arbres ainsi que l'ont montré les analyses de variance. L'analyse statistique a cependant confirmé la valeur représentative de l'échantillonnage que nous avons effectué. Il est possible de différencier trois grands types d'aiguilles, caractéristiques du plein découvert, de la coupe d'abri et de la clairière. A l'intérieur de cette dernière, il est difficile de caractériser chaque situation. Pour les trois sapins et le douglas, les aiguilles de la coupe d'abri sont plates, minces et présentent des bordures très aigues alors que dans le cas du plein

(1) Dans le cas des couverts fermés des peuplements adultes, il faut ajouter que si le microclimat influence la forme et la structure de l'appareil foliaire, inversement ce dernier affecte fortement les facteurs climatiques. C'est ainsi que l'on peut définir et mettre en évidence des profils microclimatiques typiques de tel ou tel couvert (voir première partie)

découvert, elles sont beaucoup plus épaisses. Le rapport $\frac{1}{E}$ qui rend compte de la forme de la section de l'aiguille est toujours le plus faible en plein découvert. Les aiguilles de la clairière sont intermédiaires entre celles de la coupe d'abri et celles du plein découvert. Ces résultats sont voisins de ceux trouvés par TRONCHET (1956) qui a montré que l'épaisseur des feuilles de chêne rouvre augmentait avec l'éclairement relatif. Les types intermédiaires seront difficiles à mettre en évidence. Chez l'épicéa, le même effet existe, mais il apparaît sur le rapport D/d, les aiguilles sont aplaties dans la coupe d'abri (D/d élevé) et "globuleuses" dans le plein découvert (D/d faible).

Les observations de MER (1883) dans un peuplement de Picea abies et les mesures que nous avons effectué dans une hêtraie (AUSSENAC DUCREY résultats non encore publiés) nous conduisent à penser que l'on retrouvera ces trois grands types de feuilles du haut en bas des houppiers dans les couverts forestiers fermés.

En ce qui concerne les stomates, l'effet du traitement n'est pas toujours significatif, alors que l'on aurait pu imaginer le contraire. En effet, certains auteurs (GINDEL, 1969) ont montré que le nombre et la dimension des stomates étaient sensibles aux conditions de milieu. Les traitements diffèrent essentiellement dans ces expériences par l'énergie reçue et par les conditions d'alimentation en eau. Il aurait donc fallu étudier l'effet de chacun de ces facteurs. Mais, dans la nature, il y a une interrelation entre ces paramètres. En effet, à des éclaircissements importants correspondent des conditions d'alimentation en eau difficile (ETP élevé) pour les jeunes plants. Quand l'éclairement diminue, les conditions d'alimentation en eau s'améliorent car l'évapotranspiration potentielle baisse au niveau des feuilles.

D'après les études effectuées par divers auteurs (DUFOUR 1887, SCHOCH 1972), le nombre de stomates augmenterait avec l'énergie lumineuse reçue et l'état de siccité du sol. Ainsi, dans le cas présent, le traitement de plein découvert devrait présenter le nombre de stomates le plus élevé. Les autres traitements devraient avoir dans leur ensemble une numération stomatique inférieure. C'est vrai dans certains cas, Pseudotsuga menziesii

et Abies alba (Ecouves) (Figure n° 47), mais pas dans tous. Dans ce cas précis, il est donc difficile de tirer des numérations stomatiques une conclusion quant à la signification écologique des traitements.

Les dimensions des stomates selon certains auteurs (De PARCEVAUX, 1964) varient avec la sécheresse du sol et de l'air et seraient plus faibles dans les stations "sèches". Compte-tenu des conditions microécologiques de nos traitements, les stomates devraient être plus petits dans le plein découvert et la coupe d'abri. C'est ce qui se produit pour les trois sapins sans que l'effet soit significatif au seuil de probabilité choisi. De ce point de vue, les différences écologiques ne sont sans doute pas suffisantes pour entraîner des variations significatives.

En ce qui concerne les dimensions des aiguilles, il apparaît que les 2 provenances de sapin ont des dimensions très voisines et que sur ce plan là, il semble que l'on ne puisse pas espérer les distinguer. GATTI (1970) qui a étudié plusieurs provenances de Pseudotsuga menziesii est arrivé aux mêmes conclusions.

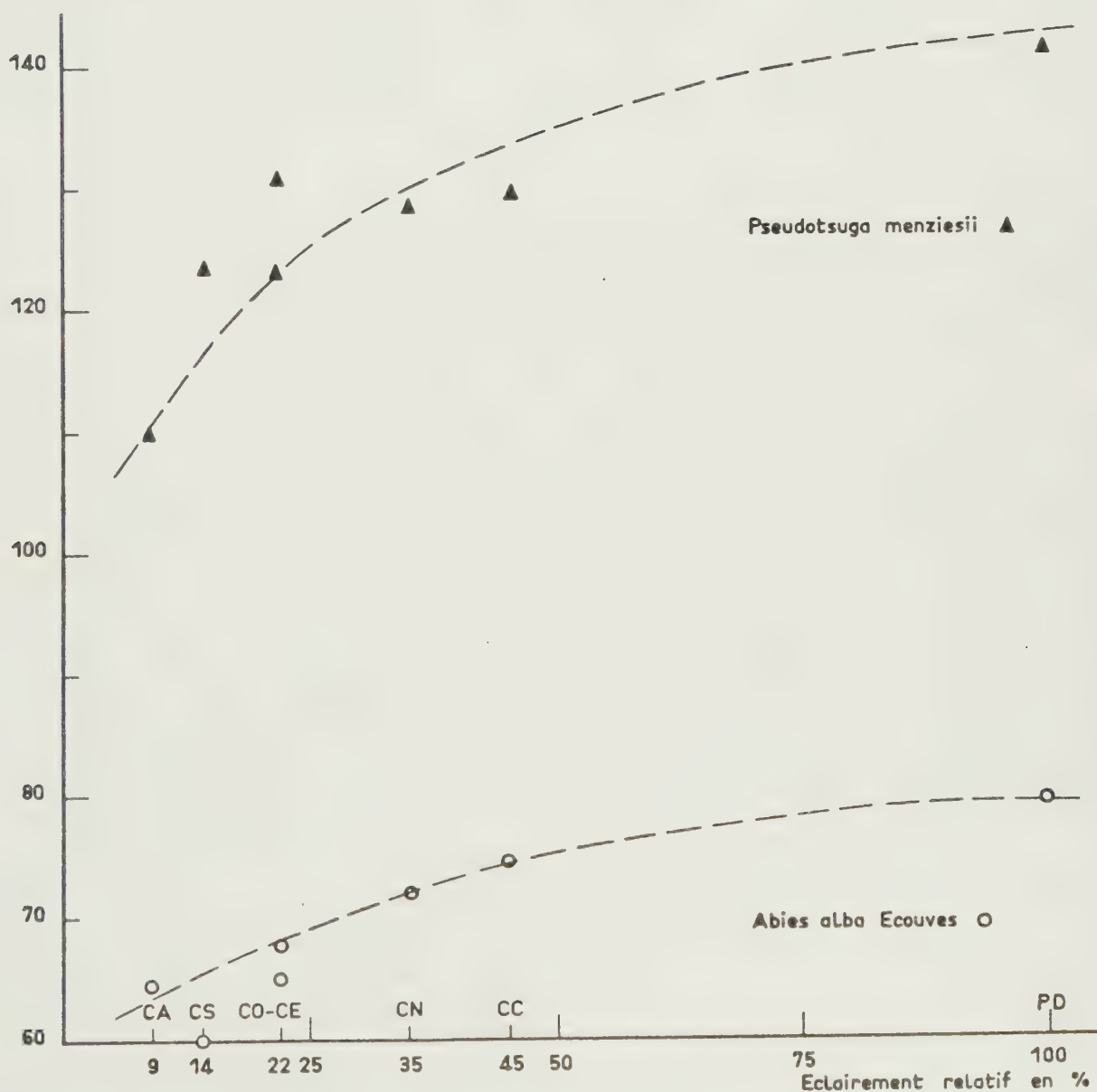
Le nombre et les dimensions des stomates sont du même ordre de grandeur que ceux cités par certains auteurs (ARENA, 1960. NAPP. ZIIN 1966). Dans l'ensemble, remarquons que les deux provenances de Sapin pectiné et le Sapin de Nordmann ont des numérations stomatiques très voisines (60-80 stomates/mm² surface foliaire chez Abies alba Ecouves II, 62 à 78 st/mm² chez Abies alba Canigou, 63 à 86 st/mm² chez Abies nordmanniana). Par contre, le douglas a une numération stomatique beaucoup plus élevée (de 110 à 142 stomates/mm² de feuille selon les traitements). Les dimensions des stomates des 2 provenances de sapin pectiné et de sapin de Nordmann sont aussi très voisines ; par contre, elles sont beaucoup plus faibles chez le douglas. Il y a là incontestablement une différence importante entre les sapins et le douglas, qui a une densité stomatique plus élevée et des stomates plus petits. Il est possible que ces caractéristiques correspondent à une meilleure adaptation du Douglas vis-à-vis de l'économie de l'eau (1). En effet, il est actuellement prouvé (STALFELT, 1932, DE PARCEVAUX, 1964) que des stomates nombreux et petits permettent une meilleure régulation de la transpiration que des stomates peu nombreux et grands. De ce point de vue, il

(1) Cette conclusion est recoupée par des observations de terrain qui montrent que le sapin est plus sensible à la sécheresse que le douglas.

FIGURE 47

VARIATION DU NOMBRE DES STOMATES EN FONCTION DE
L'ECLAIREMENT RELATIF CHEZ ABIES ALBA ET CHEZ
PSEUDOTSUGA MENZIESII.

Nombre de
stomates/mm²
de surface foliaire



serait sans doute intéressant d'étudier pour différentes provenances de Douglas la variabilité de ces caractères : nombre et dimensions des stomates.

On peut penser que ce double caractère reflétant l'adaptation d'une espèce ou provenance doit être recherché chez les essences offrant une grande variabilité d'adaptation aux facteurs écologiques. Il semble en effet que pour 100 cellules épidermiques, le nombre de stomates soit génétiquement fixé. Ce qui varierait, ce serait la taille des cellules selon l'importance de la sécheresse.

L'étude effectuée montre également que l'influence des facteurs microclimatiques responsables d'une croissance différente, ne se traduit pas au niveau anatomique et morphologique par une accommodation aussi fine que nous aurions pu l'espérer à priori.

L'anatomie et la morphologie des feuilles sont la résultante de très nombreux éléments. Nous n'en avons étudié que quelques-uns. Au niveau de ces éléments, les effets biologiques peuvent se cumuler et non se retrancher d'où finalement des actions physiologiques non négligeables.

Pour l'architecture de l'arbre (disposition des branches), l'influence du microclimat existe également. Nous avons pu montrer que plus l'éclairement diminue, plus les branches des résineux étudiés se rapprochaient de la position horizontale. Ainsi, il est possible de dire qu'il existe une "adaptation" d'ensemble de la partie aérienne de l'arbre. Il est probable (ROUSSEL, 1972), qu'il en est de même pour la partie souterraine. Le développement des parties aériennes et souterraines de l'arbre se fait en fonction des conditions microclimatiques. Il en résulte un état d'équilibre qui reflète la possibilité d'adaptation de l'espèce aux conditions qui lui sont faites.

V. CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DE L'ÉCOLOGIE DE ABIES ALBA,
ABIES NORDMANNIANA, PICEA ABIES ET PSUEDOTSUGA MENZIESII.

A. INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons montré que la connaissance des interactions climat - forêt était nécessaire à une bonne compréhension du fonctionnement des peuplements forestiers. Le comportement écophysologique des espèces est une autre composante essentielle de ce fonctionnement. Il correspond à ce que les forestiers appellent le "tempérament des essences". Ce tempérament des espèces relève de leur réponse aux facteurs du milieu et particulièrement aux facteurs climatiques ou microclimatiques (lumière, eau, température, pouvoir évaporant de l'air). L'interprétation objective de l'écophysologie des espèces forestières n'est pas possible si on n'a pas analysé correctement les relations réciproques de l'espèce (1) et des facteurs écologiques.

Dans ce chapitre, à titre d'exemple, nous analyserons l'écophysologie de : Abies alba, Abies nordmannia, Picea abies et Pseudotsuga menziesii à partir de l'étude des interactions climat $\longleftrightarrow$ forêt que nous avons effectué dans les chapitres précédents.

B. ABIES ALBA

Ce conifère de l'étage montagnard humide de l'Europe moyenne et méridionale a une aire étendue et morcelée. Il existe de ce fait de nombreuses races géographiques.

Dans notre travail nous avons considéré trois provenances différentes par leur origine géographique et par l'altitude : Ecouves dans l'Orne à 300 m d'altitude, Nébias dans l'Aude à une altitude de 600 m et enfin Canigou dans les Pyrénées Orientales à 1800 m d'altitude. Il est intéressant sur le plan de la connaissance de l'espèce d'essayer de mettre en évidence des comportements différents dans des conditions microclimatiques définies.

(1) Il est souvent nécessaire de distinguer les différents écotypes d'une même espèce.

D'une manière générale le Sapin pectiné est considéré comme une essence d'ombre par opposition aux espèces de lumière. (Pin sylvestre par exemple). Nous rappelons ici que par essence d'ombre, on entend une espèce forestière qui est capable de croître sous un éclaircissement très faible. Par opposition, une essence de lumière ne peut pas se développer à l'ombre et elle disparaît rapidement. Entre ces deux classes extrêmes, il est possible de distinguer des intermédiaires (demi-ombre et demi-lumière), (PERRIN 1963).

L'examen des résultats que nous avons obtenu et plus particulièrement le tableau n° 27 montre que Abies alba dans les 3 provenances, a comparativement aux 3 autres espèces étudiées, le meilleur comportement sous coupe d'abri, c'est-à-dire sous un éclaircissement très faible. En effet, dans la coupe d'abri, la croissance en hauteur de 1967 à 1973 représente 20,9 % (Abies alba Ecouvès), 24,7 % (Abies alba Nebias) et 21,3 % (Abies alba Canigou) de la croissance de la clairière. Effectivement donc, le Sapin pectiné se présente comme une espèce tolérant l'ombre. Il n'est pas par ailleurs possible de différencier à ce niveau d'étude les 3 provenances.

L'étude des phénomènes de croissance nous a montré que en "condition naturelle", le Sapin pectiné avait une croissance maximum pour des éclaircissements relatifs de 50 % E_R . Mais nous avons également démontré que dès lors, que l'alimentation hydrique était optimale, la croissance maximum s'observait en plein découvert (100 % E_R). Ainsi donc, en réalité, deux notions doivent être distinguées pour bien comprendre l'écophysiologie de cette espèce :

- d'une part, la possibilité effective pour le Sapin pectiné de croître sous un éclaircissement faible, d'y avoir un développement réduit mais avec un bon état végétatif.

Ce résultat peut s'expliquer par une potentialité de photosynthèse élevée pour les feuilles d'ombre ainsi que l'on peut le voir sur la figure n° 48 (1). On se rend compte ici que le rendement

(1) Courbes de photosynthèse établies sur rameau coupé en condition standard : 20° C 70 HR - alimentation en eau optima.

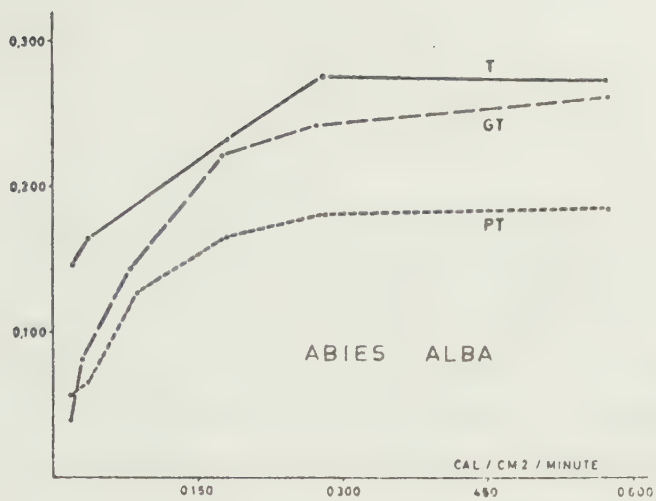
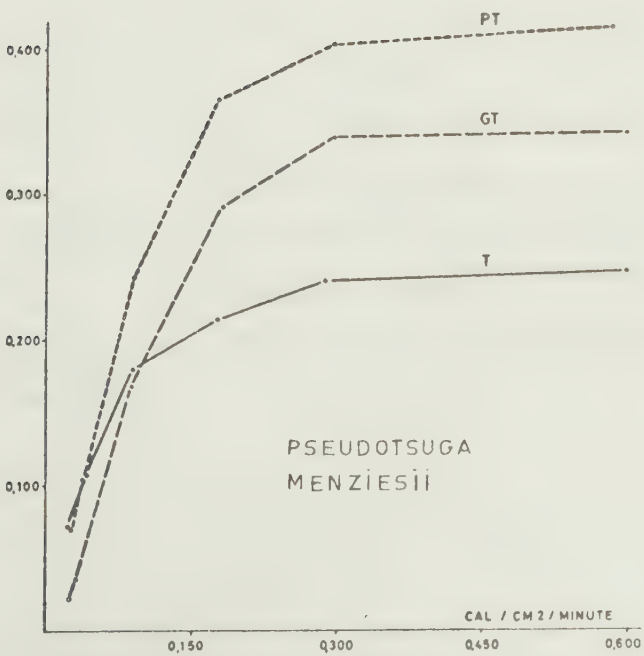
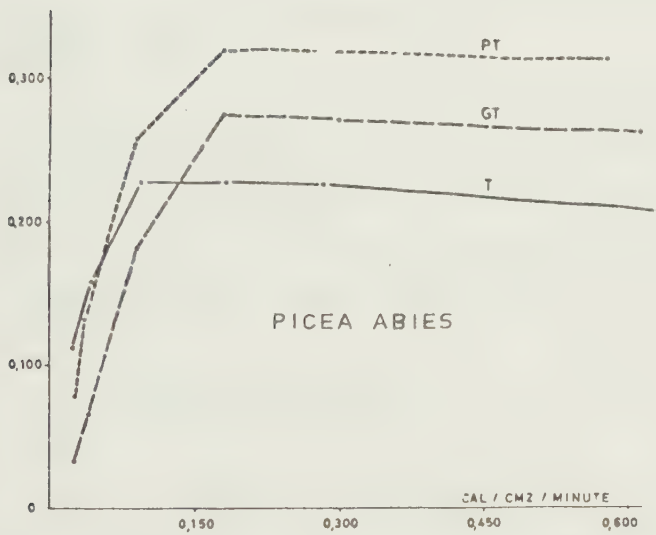


FIGURE 48
PHOTOSYNTHESE NETTE
(mg CO₂/cm²/heure)
DE RAMEAUX PRELEVES
DANS LA COUPE RASE(GT)
DANS LA CLAIRIERE(PT)
ET LA COUPE D'ABRI(T).



photosynthétique des feuilles d'ombre est élevé non seulement aux éclairagements faibles mais aussi aux éclairagements forts. Cette grande efficience des feuilles d'ombre peut être attribuée à des différences anatomiques. Dans notre étude, nous avons montré que les feuilles d'ombre du sapin présentent des caractéristiques anatomiques et morphologiques très différents des feuilles de lumière (*voir chapitre n° IV*). Il est en effet possible d'imaginer que dans ce type de feuilles la résistance à la diffusion du CO_2 de l'atmosphère vers les sites de carboxylation est très réduite (DE PARCEVAUX, 1973). Des différences de configuration des chloroplastes et de teneur en chlorophylle peuvent être également avancées (TRANQUILLINI 1954 - WASSINK et al 1956 - BORMANN 1958).

- d'autre part, l'importance pour cette espèce d'un bon équilibre hydrique pour assurer une bonne croissance. Nous pouvons ainsi expliquer le fait que dans les régions à déficit hydrique fréquent, cette essence croisse beaucoup mieux dans les clairières ou toute situation abritée (lisière par exemple) que les zones découvertes.

C. ABIES NORDMANNIANA

Le sapin de Nordmann est une espèce qui est originaire du Caucase oriental et de la chaîne pontique au Nord-Est de la Turquie. Il s'agit donc d'une espèce plus méridionale que le Sapin pectiné. On admet qu'elle est plus résistante à la sécheresse que ce dernier (DEBAZAC, 1964).

Dans notre travail, il est apparu que son comportement à l'ombre était différent d'Abies alba. Dans la coupe d'abri, la croissance n'est également qu'à 16,9 % de celle de la clairière (*tableau n° 28*).

L'étude des phénomènes de croissance nous a montré que son zéro de végétation était de $6,2^\circ \text{C}$ donc plus élevé que celui du sapin pectiné ($5,2^\circ \text{C}$).

Nous n'avons pas pu tester l'action du facteur eau ; mais il est probable que sur ce point, son comportement est voisin de celui du sapin pectiné.

D. PICEA ABIES

L'Epicea commun est une espèce de l'Europe moyenne et septentrionale. Son aire est très morcelée et de ce fait de nombreuses races locales peuvent être distinguées (DEBAZAC 1964). Dans notre travail, nous n'avons considéré qu'une provenance : La Joux dans le Jura.

L'Epicea est de toutes les espèces que nous avons étudié, celle qui a eu le plus mauvais comportement sous faible éclairément.

La croissance dans la coupe d'abri est très faible et elle ne représente que 11,8 % de la croissance de la clairière. L'effet dépressif est donc considérable (*tableau n° 28*).

On peut essayer de mettre ces faits en corrélation avec l'efficacité photosynthétique des différentes catégories de feuilles. La figure n° 48 montre que l'efficacité des feuilles d'ombre de l'Epicea, si elle est voisine des feuilles de lumière, aux très faibles éclairéments, est par contre très limitée dès que l'éclairément augmente un peu. Les résultats de PISEK et al (1959), sont du même type mais l'inversion feuilles d'ombre, feuilles de lumière se situe à des éclairéments plus importants. Il y a là donc une différence de comportement très importante avec le Sapin.

Nous avons vu dans le chapitre IV que les feuilles d'ombre, de même que chez le Sapin, présentaient des caractéristiques morphologiques et anatomiques très différentes de celles des feuilles de lumière. Il semble donc que sur ce plan là, les possibilités d'adaptation soient aussi importantes que chez le Sapin pectiné. Il est donc possible d'imaginer que c'est au niveau des chloroplastes que se situent peut être les différences. On expliquerait alors ainsi la croissance plus rapide qui se manifeste dans la coupe rase dès que l'alimentation hydrique devient plus favorable. Nous avons vu que dans notre cas, cette situation intervenait 4 ans après plantation. En conclusion, il est évident que l'Epicea ne peut plus être considéré comme une essence d'ombre.

E. PSEUDOTSUGA MENZIESII

Cette espèce introduite a une vaste aire dans l'Ouest de l'Amérique du Nord. De nombreux écotypes peuvent bien entendu être distingués. Ici, nous n'avons étudié qu'une seule provenance adaptée aux conditions de la France moyenne.

Les résultats de nos recherches montrent que le Douglas apparaît comme une espèce "intermédiaire" entre le Sapin pectiné et l'Epicea ; tolérant mieux l'ombre que ce dernier. Il se montre également sensible aux conditions d'alimentation en eau et il présente une excellente croissance dans la clairière. Mais au bout de quelques années (7 ans après plantation, plus tard que l'Epicea), ce sont les conditions de coupe rase qui assurent la meilleure croissance. Le Douglas a un zéro de végétation : $5,8^{\circ}$ C relativement élevé. Cette caractéristique pourrait peut être expliquer en partie le comportement de cette essence en montagne. En effet, alors qu'en plaine ou en basses montagnes sa croissance est supérieure à celle de l'Epicea (1), en moyenne montagne au-dessus de 1000 m c'est le contraire. Les courbes de photosynthèse nette/éclairage (figure n°48) révèlent aussi un comportement différent du Sapin et de l'Epicea.

F. CONCLUSION

L'exploitation des résultats présentés dans les chapitres précédents (Interactions du couvert forestier avec les facteurs climatiques) nous a permis de rendre compte du "tempérament" de quelques essences forestières et par la même de préciser leur comportement écologique. Cette même analyse de la première et de la deuxième partie de notre travail va nous permettre d'examiner les conséquences sylvicoles de notre travail.

(1) Nous avons montré que l'Epicea avait un zéro de végétation relativement bas : $4,1^{\circ}$ C.

TROISIÈME PARTIE :

CONSÉQUENCES SYLVICOLES

I. INTRODUCTION

Dans les première et deuxième parties de notre travail, nous avons étudié les interactions forêt $\rightleftharpoons$ climat et nous avons montré que leur connaissance était essentielle pour la compréhension du fonctionnement des peuplements forestiers. Nos résultats intéressent directement le sylviculteur qui s'efforce d'orienter et de conduire les peuplements vers les buts qu'il s'est assigné.

L'interaction forêt $\rightleftharpoons$ climat se situe à plusieurs niveaux : la feuille puis l'arbre, puis le peuplement et enfin le massif forestier. La connaissance de cette interaction à ces différentes échelles permet au forestier d'agir tantôt ponctuellement, tantôt plus globalement.

Dans ce chapitre, compte-tenu des résultats présentés, nous essayerons d'apporter une contribution à la science sylvicole dans deux domaines :

- les techniques de régénération naturelles ou artificielles ;
- l'aménagement hydrologique des bassins versants boisés.

II. LES TECHNIQUES DE REGENERATION NATURELLES OU ARTIFICIELLES

Le plus souvent, lorsque le forestier est amené à régénérer naturellement un peuplement de futaie, il n'enlève que progressivement le matériel existant pour conserver aux jeunes semis un couvert partiel qui jouera temporairement le rôle d'abri. Il arrive cependant que le praticien est obligé,

soit de reconstituer un peuplement, soit de transformer par enrésinement une forêt feuillue économiquement peu productrice. Dans ce cas, plusieurs techniques peuvent être employées :

- plantation sous couvert en utilisant la méthode des coupes progressives pour enlever l'abri en plusieurs temps ;
- plantation après coupe rase ;
- plantation en trouées ou en bandes.

Une des préoccupations essentielles du forestier est la recherche des conditions optimales de croissance. Mais pour résoudre ce problème, il est nécessaire de connaître à la fois la signification microclimatique des différents traitements sylvicoles envisageables et l'écophysiologie des essences que l'on souhaite utiliser.

Deux soucis majeurs doivent alors être distingués :

- préserver les jeunes régénérations des accidents climatiques : essentiellement les gelées tardives qui peuvent les compromettre gravement ;
- améliorer les conditions générales de développement et de croissance.

Il faut reconnaître que dans bien des cas, ces deux soucis essentiels ont été réunis à tort en une notion globale source de confusions.

En France, les accidents climatiques les plus fréquents sont constitués par les gelées tardives. Elles constituent un handicap important pour les reboiseurs. En effet, un certain nombre d'espèces : Abies alba, Picea abies, Pseudotsuga menziesii débourrent précocement et peuvent avoir leurs bourgeons terminaux de la flèche détruits. L'accroissement en longueur est ralenti, mais quelquefois, le résultat peut être la mort du jeune plant après plusieurs gelées successives. On sait en effet, que si l'appareil foliaire n'est pas rajeuni, son efficacité baisse peu à peu.

Pour une espèce donnée, le risque de dégâts dépend de la probabilité de gelée et de la période de débourrement (AUSSENAC, 1973). Pour diminuer le risque de dégâts, deux voies sont possibles.

- rendre minimale la probabilité des gelées par l'intermédiaire de la sylviculture et des traitements sylvicoles ;

- améliorer les géotypes afin de retarder la date du débourrement.

Nous avons d'ailleurs montré (AUSSENAC, 1973), que la solution réside dans l'utilisation combinée de ces deux modes d'action, particulièrement dans le cas d'espèces à faible variabilité comme le Sapin pectiné.

A. PROTECTION CONTRE LES GELEES

Nous nous attacherons ici simplement au rôle possible du sylviculteur dans la diminution des risques de dégâts de gelée.

Dans notre première partie, nous avons étudié les mécanismes d'établissement des profils thermiques et particulièrement des températures nocturnes et des indices actinothermiques au niveau du sol et des surfaces végétales.

Nous avons montré que les risques de gelée tardive étaient plus faibles dans la coupe d'abri et dans la clairière que dans la coupe rase. Dans cette dernière situation, l'influence de la strate herbacée est déterminante. Mais on ne sait pas assez que les bandes forestières présentent des risques qui se rapprochent de ceux de la coupe rase.

A titre d'exemple, nous allons étudier comparativement l'effet d'une gelée tardive dans la coupe rase, la coupe d'abri et la clairière. Nous rappelons que dans ces 3 milieux nous avons installé par plantation 6 espèces de résineux. Le 4 mars 1967, il y a eu à Amance, une gelée tardive qui d'ailleurs a été générale dans le Nord-Est de la France. Dans le tableau n° 37, nous avons regroupé les températures maxima et minima sous abri, les indices actinothermiques minima à 20 cm de hauteur la veille et le jour de la gelée. Les dégâts relatifs à cette gelée ont été constatés le 9 mai 1967. Les résultats des observations effectuées à cette date sont condensés dans le tableau n° 38. Nous avons indiqué dans le tableau n° 39 le nombre de plants ayant le bourgeon terminal de la flèche gelé et le nombre de plants ayant le bourgeon terminal d'un rameau latéral gelé. Nous donnons aussi les pourcentages correspondants (AUSSENAC, 1967).

Voici notre analyse :

- les températures :

L'examen du tableau n° 37 montre que la coupe rase a eu la température minima sous abri et l'indice actinothermique minima le plus bas :

- 3.0° C et - 4.0° C. La coupe d'abri a présenté les valeurs les plus élevées respectivement - 0,9° C et 1,2° C. Dans les différentes situations de la clairière, nous avons relevé des températures intermédiaires puisque en ce qui concerne les indices actinothermiques, ils ont été compris entre - 2,3° C (au Sud) et - 1,8° C (à l'Est). En conclusion, nous pouvons remarquer un effet protecteur certain du couvert dans la coupe d'abri et à un degré moindre dans la clairière. Nous l'avions déjà mis en évidence dans la première partie (*chapitre II*).

TABEAU N° 37

TEMPERATURES DE L'AIR SOUS ABRI ET INDICES ACTINOTHERMIQUES
LA VEILLE ET LE JOUR DE LA GELEE TARDIVE DU 4 MAI 1967 EN
FORET D'AMANCE.

(T_M température maximum ; T_m température minimum)

DATE	COUPE RASE			COUPE D'ABRI			CLAIRIERE						
	T _M	T _m	Indice actino 20 cm	T _M	T _m	Indice actino 20 cm	T _M	T _m	Indices actinothermiques à 20 cm				
									Centre	Nord	Sud	Est	Ouest
3 mai 1967	10,8	- 0,5	- 0,7	9,5	0,2	0,5	11,5	0,0	- 0,3	- 0,1	- 0,5	- 0,2	0,0
4 mai 1967	17,5	- 3,0	- 4,0	15,5	- 0,9	- 1,2	17,5	- 1,8	- 2,2	- 2,1	- 2,3	- 1,8	- 2,1

- l'état phénologique

A cette date du 3 mai 1967, à quel ~~stade~~ stade phénologique se trouvaient les arbres que nous étudions. Le tableau n° 38 donne d'une part, le stade phénologique moyen à cette date (bourgeon terminal de la flèche) et d'autre part, le nombre de plants se trouvant à un stade phénologique avancé (toujours pour le bourgeon terminal de la flèche).

Les plants d'Abies alba dans les 3 provenances se situaient en moyenne au stade b 2 c'est-à-dire, que les bourgeons terminaux de la flèche approchaient du débourrement puisque nous estimons que le débourrement se situe au stade b 2,5 (*voir chapitre II, deuxième partie*). Un certain nombre de plants avaient dépassé ce stade et se trouvaient en b 3 ou b 4.

Les plants d'Abies nordmanniana et de Picea abies se trouvaient à un stade phénologique proche du repos hivernal b 0 ou b 1.

Pseudotsuga menziesii présentait des arbres ayant un stade phénologique moyen de 1.5 qui était l'indice d'une évolution des bourgeons vers le débourrement. Quelques plants seulement avaient atteints un stade avancé (b 3 ou b 4).

TABLEAU N° 38

ÉTAT PHÉNOLOGIQUE LE 3 MAI 1967

(veille de la gelée)

SITUATIONS		<u>Abies alba</u> Ecouves	<u>Abies alba</u> Nebias	<u>Abies alba</u> Canigou	<u>Abies</u> <u>Nordmanniana</u>	<u>Picea</u> <u>abies</u>	<u>Pseudotsuga</u> <u>menziesii</u>
Coupe d'abri	Stade phéno moyen	1,8	1,9	1,8	1,1	0,5	1,4
	Nbre plants	1 b 4	7 b 3	1 b 3	1 b 3	3 b 3	7 b 3
	Stade phéno avancé	11 b 3 2 b 2,5	3 b 2,5				
Clairière	Stade phéno moyen	2,0	2,1	2,2	1,1	0,6	1,5
	Nbre plants	11 b 3	14 b 3	8 b 3	1 b 3	4 b 3	2 b 4
	Stade phéno avancé		1 b 2,5	1 b 2,5			6 b 3
Coupe rase	Stade phéno moyen	1,9	2,2	1,9	1,1	1,0	1,6
	Nbre plants	12 b 3	1 b 4	4 b 3			1 b 4
	Stade phéno avancé		25 b 3				6 b 3

- les dégâts

En ce qui concerne les dégâts qu'avons nous constaté ? (tableau n° 39)

Dans la coupe d'abri, aucun dégât. Dans la clairière dégâts sur les bourgeons latéraux des 3 provenances de Abies alba. Les dégâts les moins importants ont été notés chez la provenance Canigou 3,5 % contre 21.0 % pour Nébias et 17 % pour Ecouves. Pour les autres espèces, il n'y a eu aucun dégât.

Dans la coupe rase, les dégâts ont été très importants. En ce qui concerne le bourgeon terminal de la flèche, ce sont les 3 provenances de Abies alba qui ont le plus souffert : 19,8 % des arbres chez Ecouves, 18.6 % chez Nébias et 13,8 % chez Canigou. Les rameaux latéraux ont été très fortement affectés respectivement 86,2 %, 97,2 % et 79,3 %. Certains plants ont été entièrement gelés et n'ont fait aucune pousse en 1967. Dans cette situation de coupe rase, des dégâts faibles ont été notés sur les bourgeons terminaux de la flèche des autres espèces, chez Abies nordmanniana : 2.1 % des arbres et 8.2 % des arbres chez Pseudotsuga menziesii. Picea abies (1) n'a pas été affecté par la gelée.

L'analyse de l'état phénologique des bourgeons qui ont été gelés montre que la plupart d'entre eux étaient au stade b 3 ou b 4 c'est-à-dire que le débourrement était effectivement réalisé. Ces dégâts se sont produits pour des indices actinothermiques de - 4,0° C.

(1) Nous avons utilisé dans notre travail une provenance de Picea abies à débourrement tardif. Il existe d'autres provenances plus précoces et donc plus sensibles aux gelées tardives.

TABLEAU N° 39

DÉGÂTS DE LA GELÉE DU 4 MAI 1967

Nombres d'arbres atteints en valeurs absolues et en pourcentage du nombre total d'arbres

ESPECES	Coupe rase				Clairière				Coupe d'abri			
	Bour- geons laté- raux	%	Bour- geons termi- naux	%	Bour- geons laté- raux	%	Bour- geons termi- naux	%	Bour- geons laté- raux	%	Bour- geons termi- naux	%
<u>Abies alba</u> Ecouves	50	86,2	11	19,0	10	17,0	0	0	0	0	0	0
<u>Abies alba</u> Nebias	68	97,2	13	18,6	14	21,0	0	0	0	0	0	0
<u>Abies alba</u> Canigou	23	79,3	4	13,8	2	6,5	0	0	0	0	0	0
<u>Abies</u> <u>nordmanniana</u>	3	6,3	1	2,1	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>Picea</u> <u>abies</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>Pseudotsuga</u> <u>menziesii</u>	4	8,2	4	8,2	0	0	0	0	0	0	0	0

Il est certain que le couvert forestier exerce un effet protecteur. Mais dans le cas des feuillus cet effet sera vraiment net seulement quand les arbres seront feuillés, feuillaison du couvert préexistant puis débourrement des régénérations ou au moins simultanéité des deux phénomènes constituent une bonne protection ; sinon le rôle du couvert est très amoindri ainsi que nous avons pu le constater dans les bandes en Forêt d'Epinal (1)

(1) D'où, on le voit, l'intérêt du charme (Carpinus betulus) qui, on le sait, débourre tôt au printemps.

Dans la clairière, on a noté un effet protecteur non négligeable mais la synthèse des études réalisées par nous-même et par divers auteurs montre que cet effet protecteur diminue rapidement quand le rapport diamètre de la clairière (D) augmente ; il peut être considéré comme nul pour $\frac{D}{H} \gg 3$.

Si l'on envisage de traiter l'ensemble d'une parcelle, un autre facteur important apparaît = le rapport Surface des clairières .

Surface du peuplement restant

En effet, pour que le rôle protecteur du couvert soit réel, il faut que ce rapport soit au plus égal à 1. On retrouve ce problème dans le cas des bandes boisées qui, nous l'avons vu (*chapitre II, première partie*) ont un rôle modérateur faible ou nul quand le rapport largeur de la bande $\gg 1$.
hauteur du peuplement

et quand le rapport largeur de l'interbande ≤ 1 .
largeur de la bande

Dans le cas où la plantation ne peut s'effectuer qu'en coupe rase, certaines techniques peuvent être employées pour diminuer le risque de dégâts de gelée (AUSSENAC, 1970). Elles reposent sur l'examen des profils thermiques si différents observés en sol nu ou au contraire couvert de végétation (*voir chapitre IV, première partie*) et sur les phénomènes d'écoulement d'air.

En sol nu, les indices actinothermiques les plus faibles s'observent près du sol ; en terrain enherbé, ils se situent à la partie supérieure du tapis herbacé donc, à niveau égal au-dessus du sol, les situations sont très différentes et généralement au désavantage du terrain couvert de végétation. De nombreuses observations ont d'ailleurs été faites à ce sujet. Un plant enfoui entièrement dans une strate herbacée importante présentera des bourgeons qui seront relativement protégés au départ. Mais dès que le plant va sortir de la végétation ambiante, il se trouvera dans de très mauvaises conditions. Nous avons pu étudier ce phénomène en Forêt d'Amance dans une plantation de sapins pectinés recouverte par un tapis de ronces. Au moment où les plants ont commencé à émerger des ronces, ils ont été gelés et nous avons pu constater ensuite toutes les conséquences classiques : flèches multiples, aspect en pommier, perte de la dominance apicale. Ces résultats motivent les conseils que voici :

- dans le cas où il s'agit de plants de petite taille et d'une espèce à croissance lente, il est opportun de laisser la végétation naturelle basse recouvrir les plants. Il est simplement nécessaire d'enlever et de détruire le couvert des ronces ou de tout autre végétal dans le courant de l'année qui précède l'émergence probable des plants.

- dans le cas où il s'agit de plants d'assez grande taille (Douglas par exemple), et à croissance rapide, il est préférable de maintenir un tapis herbacé et arbustif aussi réduit que possible dès la plantation.

Une remarque supplémentaire peut être faite : dans l'hypothèse d'une plantation sur une pente avec en aval un peuplement forestier fermé par un sous-bois abondant, il est éminent souhaitable d'enlever le sous-étage en lisière et d'éviter tout andainage des restes de l'exploitation sur place afin de faciliter l'écoulement de l'air froid vers les zones plus basses.

B. AMELIORATION DE LA CROISSANCE

La recherche de la protection contre les gelées tardives ne doit pas faire oublier qu'il faut aussi améliorer les conditions générales de croissance. Nous avons vu que si, la coupe d'abri avait un rôle modérateur des gelées tardives instable, elle motivait par contre un microclimat général défavorable à la bonne croissance des jeunes plants. Il apparaît donc que la coupe d'abri constitue une technique sylvicole discutable sauf si on a les moyens de pratiquer une sylviculture attentive et coûteuse qui consisterait à éclaircir progressivement et assez rapidement (quelques années) le couvert.

Les plantations en clairières ou en bandes paraissent être une solution écologiquement et même techniquement plus intéressantes. En effet, nous avons vu qu'il était possible par ces systèmes de diminuer les risques de gelées mais en même temps d'améliorer les conditions de croissance. Dans les conditions écologiques de nos expérimentations, nous pouvons conclure que l'éclaircissement relatif de départ devrait être compris dans une "fourchette" de 15 à 50 %. Pour les espèces étudiées, l'éclaircissement relatif doit être porté à 100 % dès 6 à 7 ans après la plantation pour l'Epicéa, le Sapin de

Nordmann et le Douglas, et dès 10 ans pour les Sapins pectinés. Le décalage entre les deux groupes se justifie par une sensibilité différente aux gelées tardives.

Il faut remarquer que jusqu'à maintenant, nous n'avons tenu compte que des arbres qui ont survécu et se sont développés sans faire l'examen des pertes après la plantation et pendant la durée de l'expérimentation. Le tableau n° 40 donne ce bilan général. On remarque facilement que après la plantation dans la coupe rase, la perte a été importante pour les sapins et le douglas, de même sous la coupe d'abri pour l'Epicéa et le Douglas. La clairière par contre a motivé des pertes faibles sauf en ce qui concerne le Sapin de Nordmann. A la fin de l'expérimentation, le bilan général montre que les pertes les plus élevées :

20,3 % Abies alba Ecouves, 29,2 % Abies alba Nébias, 14,5 % Abies nordmanniana, 39,6 % Pseudotsuga menziesii se situent dans la coupe rase, vient ensuite la coupe d'abri.

La clairière arrive en troisième position avec des pertes comparativement très réduite.

A ce niveau d'analyse, la clairière apparaît incontestablement plus favorable que les autres milieux étudiés.

III. L'AMENAGEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS BOISES

L'influence de la forêt sur le bilan hydrologique fait l'objet de nombreuses discussions ; en effet, certains aménagistes, considérant les besoins croissants en eau dans le monde moderne, se demandent si la forêt consomme plus ou moins que d'autres formations végétales et si les résineux consomment plus ou moins que les feuillus (AUSSENAC, 1971). Ce problème devient de plus en plus d'actualité dans les grands pays industriels à la suite d'une restructuration de l'agriculture avec pour conséquences, des déboisements ou des reboisements considérables. Pour l'aménagiste, il est alors intéressant de connaître les influences des différentes essences mais aussi d'avoir des informations sur le rôle des traitements sylvicoles utilisables par le forestier.

TABEAU N 40

BILAN GENERAL DES PLANTS DES DIFFERENTES ESPECES ET PROVENANCES ETUDIEES.

SITUATIONS	EPOQUE	Abies alba-Ecouves		Abies alba nebias		Abies alba canigou		Abies nordmanniana		Picea abies		Pseudotsuga menziesii	
		Nbre Plants	%	Nbre Plants	%	Nbre Plants	%	Nbre plants	%	Nbre Plants	%	Nbre Plants	%
COUPE D'ABRI	Printemps 1967	74	100	66	100	29	100	44	100	63	100	64	100
	Fin 1967 vivant	68	91,9	65	98,5	29	100	42	95,5	56	88,9	49	76,6
	Fin 1967 mort	6	8,1	1	1,5	0	0	2	4,5	7	11,1	15	23,4
	Fin 1973 vivant	68	91,9	65	98,5	29	100	42	95,5	56	88,9	48	75,0
	Fin 1973 mort	6	8,1	1	1,5	0	0	2	4,5	7	11,1	16	25,0
CLAIRIERE	Printemps 1967	63	100	69	100	32	100	44	100	58	100	60	100
	Fin 1967 vivant	59	93,7	69	100	32	100	38	86,4	58	100	57	95,0
	Fin 1967 mort	4	6,3	0	0	0	0	6	13,6	0	0	3	5,0
	Fin 1973 vivant	59	93,7	68	98,6	32	100	37	84,1	58	100	56	93,3
	Fin 1973 mort	4	6,3	1	1,4	0	0	7	15,9	0	0	4	6,7
COUPE RASE	Printemps 1967	59	100	72	100	29	100	55	100	57	100	53	100
	Fin 1967 vivant	49	73,0	60	83,3	29	100	49	89,1	55	96,5	42	79,2
	Fin 1967 mort	10	17,0	12	16,7	0	0	6	10,9	2	3,5	11	20,8
	Fin 1973 vivant	47	79,7	51	70,8	28	96,6	47	85,5	55	96,5	32	60,4
	Fin 1973 mort	12	20,3	21	29,2	1	3,4	8	14,5	2	3,5	21	39,6

A partir des résultats de divers auteurs et de nos propres travaux, nous tenterons d'apporter une réponse partielle au moins pour les forêts du Nord-Est de la France.

La structure et l'importance du couvert forestier jouent un rôle extrêmement important et il est maintenant certain que la réduction de la densité des peuplements par éclaircie diminue l'évapotranspiration réelle (ETR) et augmente donc l'écoulement dans les bassins versants. La vigueur de l'éclaircie intervient, plus elle est forte, plus l'effet sur la diminution de l'évapotranspiration est grand. Cette variation peut être attribuée à une diminution de l'interception des précipitations (*voir chapitre III, première partie*) et aussi au fait que à la suite de la disparition de certains arbres, l'exploration racinaire est perturbée et de ce fait amoindrie. Nous avons montré que cet effet était très important dans le cas des clairières. Après une éclaircie, la diminution la plus forte de l'évapotranspiration réelle se produit l'année qui suit cette opération sylvicole. Ensuite le couvert se reconstituant peu à peu, de même d'ailleurs qu'une amélioration de la prospection du sol par les racines, l'évapotranspiration réelle augmente pour atteindre un niveau voisin de celui de départ. Ainsi pour l'alimentation en eau d'écoulement dans les bassins versants, l'existence de peuplements traités périodiquement par éclaircies plutôt fortes est très favorable. Au contraire, l'existence de peuplements trop denses abandonnés à eux-mêmes est mauvaise.

L'évolution de l'âge des peuplements entraîne un changement de leur masse foliaire et de leur système racinaire. Ces transformations ont pour conséquence des variations de l'évapotranspiration réelle. Elle augmente avec l'âge des peuplements (MOLCHANOV, 1966), passe par un maximum qui se situerait entre 60 et 80 ans, c'est-à-dire au moment où l'accroissement courant annuel (m^3/ha) est le plus fort, enfin elle diminue. Ainsi l'évapotranspiration réelle est faible dans les jeunes peuplements (jusqu'à 30 ans) et dans les très vieilles futaies claires (au-delà de 180 ans).

La comparaison de l'évapotranspiration réelle des différentes espèces est difficile (*voir chapitre III, première partie*) à cause des différences de structure, de taille et de situation. Dans les régions à déficit hydrique faible ou nul, nous pouvons admettre que durant la saison de végétation, pour des peuplements adultes à couvert fermé, de grandes dimensions et se trouvant dans des conditions générales identiques, les évapotranspirations réelles sont voisines quelle que soit l'espèce (résineux ou feuillus). On se rapproche alors de la valeur de l'évapotranspiration potentielle.

Il est alors intéressant de connaître, pour les différentes espèces forestières utilisables, le coefficient transpiratoire afin de juger de leur efficacité (rapport : Production de bois (m3)). Nous avons montré à ce

Eau évapotranspirée (m3)

sujet en Forêt d'Amance que l'Epicéa et le Sapin de Vancouver avaient une meilleure efficacité que les feuillus (pour une même quantité d'eau consommée, ils produisaient 4 fois plus de bois).

Nous pouvons dire qu'il est possible à l'heure actuelle d'influencer l'évapotranspiration réelle des peuplements forestiers en utilisant les techniques sylvicoles. Mais ces dernières doivent être raisonnées et doivent s'appuyer sur des critères écophysiologiques afin d'exploiter au mieux les possibilités de la nature. Ainsi par exemple, l'aménagement des bassins versants à relief varié peut être envisagé de façon globale. Il est alors possible de combiner de façon optimale dans un même bassin :

- en altitude une production d'eau prioritaire et aussi forte que possible. Par exemple dans les zones de condensation des brouillards, maintenir des peuplements denses pour "capter" les brouillards, dans d'autres zones au contraire, éclaircir fréquemment et fortement.

- à plus basse altitude une production de bois prioritaire, qui justement, peut être forte à ce niveau, en choisissant espèces et sylviculture les mieux adaptés à la production de bois.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Nous nous sommes efforcés de montrer que le fonctionnement de la forêt était conditionné par l'interaction du couvert forestier avec les facteurs climatiques. Dans cette interaction, nous avons distingué d'une part l'influence de la forêt sur le climat et d'autre part la réponse des arbres aux facteurs microclimatiques. Contrairement à beaucoup d'autres travaux nous avons eu pour objectif d'étudier globalement ces phénomènes. Notre travail a finalement été la convergence d'une analyse climatique et d'une analyse biologique des rapports de la forêt et du climat. Trop souvent ces rapports ont été envisagés de façon statique sans faire intervenir les éléments essentiels que sont la structure des peuplements et la variation naturelle ou artificielle de cette structure.

En réalité, cette interaction forêt  climat se manifeste à différentes échelles : la feuille, l'arbre, le peuplement et même le massif forestier. Nous voyons alors apparaître ici un concept extrêmement important qu'il convient de ne pas oublier quand on aborde l'étude du fonctionnement d'un peuplement forestier : la forêt n'est pas une juxtaposition d'arbres , c'est au contraire une communauté structurée qui résulte de l'interaction de ses différentes composantes avec les facteurs du milieu et plus particulièrement avec les facteurs climatiques. Méconnaître cette caractéristique essentielle c'est s'exposer à des interprétations erronées de la biologie de la forêt. Sur un plan pratique c'est-à-dire celui de la foresterie c'est aboutir à des conclusions partielles et trop schématiques et encourir ainsi de graves déconvenues.

Notre travail a été réalisé pour l'essentiel en Lorraine, Forêt Domaniale d'Amance (Meurthe-et-Moselle), Forêt Communale d'Epinal (Vosges) et en Normandie : Forêt Domaniale de Bellême (Orne).

- L'influence du couvert forestier sur les facteurs climatiques

L'étude des influences du couvert sur les facteurs climatiques a porté essentiellement sur la température et l'eau.

Nous avons tout d'abord étudié les profils thermiques qui s'établissent dans un peuplement et nous avons montré combien était importante la distribution des masses végétales (Houppier, troncs, sous-étage, strate herbacée).

En étudiant de même ces phénomènes dans des situations de coupe rase, nous avons pu présenter un ensemble de profils thermiques types pour quatre situations standards : plein découvert avec sol nu, plein découvert avec strate herbacée, forêt monostrate de structure simple, forêt pluristrate de structure complexe.

Nous avons confirmé que dans l'ensemble, sous le couvert forestier par rapport au plein découvert, les températures maxima sont abaissées alors que les températures minima sont relevées. Des différences à ce schéma peuvent exister en raison d'un couvert léger et d'une importante strate herbacée. Il est toujours très important dans ces comparaisons, d'avoir une description très précise de la stratification des différentes strates du peuplement.

Quand la structure de la forêt est modifiée par l'action humaine par exemple, l'influence du couvert est perturbée. C'est le cas de la clairière et des bandes forestières. Leurs dimensions sont déterminantes.

Les mesures que nous avons effectuées ont montré que dans la clairière étudiée à Amance (diamètre = 2) les températures maxima étaient voisines de celles du plein découvert et les températures minima étaient relevées. Dans les coupes par bandes largeur de la bande = 1 et 3)
hauteur du peuplement

les températures maxima étaient relevées alors que les températures minima étaient au contraire abaissées.

La plupart du temps, on n'étudie que les températures de l'air mais ce qui est très important, c'est la température du végétal et particulièrement celle des bourgeons. On se rend compte chaque jour davantage de la nécessité de mesurer ces températures pour comprendre le développement des végétaux, malheureusement, cela conduit à des manipulations difficiles.

Pour ce qui concerne la phase nocturne les indices actinothermiques rendent bien compte des températures subies par les végétaux. Ceci est très utile dans le cas des gelées de printemps. Ainsi, nous avons pu mettre en évidence le rôle modérateur du couvert forestier aussi bien dans le cas des peuplements fermés que dans le cas des clairières. Pour ces dernières, ici aussi leur dimension sont déterminantes et au-dessus d'un rapport $\frac{\text{diamètre}}{\text{hauteur du peuplement}} = 3$, l'effet protecteur du couvert environnant disparaît.

Ainsi, en ce qui concerne les températures, nous sommes arrivés à une "schématisation" d'ensemble des influences du couvert forestier.

Dans l'étude des influences de la forêt sur l'eau, nous avons commencé par une analyse détaillée du cycle de l'eau dans les peuplements forestiers. Nous avons distingué trois fractions : des précipitations (P_i) tombant sur les peuplements, les précipitations traversant le couvert et atteignant directement le sol (P_s), les précipitations s'écoulant le long des troncs (P_t) et enfin les précipitations interceptées par le couvert (I_n).

En ce qui concerne les précipitations arrivant directement au sol (P_s), nous avons pu montrer, en analysant les différents facteurs stationnels, le rôle déterminant de la structure du couvert.

L'écoulement le long des troncs (P_t) que certains auteurs considéraient comme une fraction négligeable peut en réalité représenter une part importante des précipitations incidentes (jusqu'à 15 % de P_i). Nous avons d'ailleurs pu faire à ce sujet un classement des principales espèces forestières françaises.

L'ensemble des deux fractions ($P_s + P_t$) représente la hauteur d'eau totale qui arrive au sol. Il existe une grande variabilité de cette valeur dans l'espace et dans le temps, cependant l'analyse de toutes nos données nous a conduit à admettre une "loi de distribution" des précipitations sous le couvert. Il nous a été possible de tracer son schéma théorique : autour des troncs, on rencontre une zone très bien alimentée en eau grâce aux effets cumulés de l'écoulement le long des fûts (P_t) et des précipitations arrivant directement (P_s). Ensuite, en s'éloignant du tronc, il y a diminution des hauteurs d'eau puis augmentation jusqu'à atteindre les valeurs des précipitations incidentes (P_i) dans les trouées séparant les arbres.

L'interception (I_n) représente la fraction des précipitations qui reste bloquée au niveau des houppiers et des branches. On peut écrire $I_n = P_i - (P_s + P_t)$.

Elle représente une fraction qui, dans nos placettes, peut être comprise entre 19 et 43 % de P_i . L'ensemble des placettes que nous avons étudié nous permet d'avoir un échantillonnage représentatif de la forêt française dans la partie Nord de la France. L'interception varie avec l'importance des précipitations incidentes et nous avons pu montrer, à l'aide des données de plusieurs stations climatologiques françaises l'influence du climat général sur les pourcentages d'eau interceptée.

Nous avons introduit une notion nouvelle : la capacité de saturation maximum des houppiers. Les valeurs obtenues sont faibles : 3 à 4 mm. La définition et la mesure de ce paramètre nous a permis de mieux préciser le rôle réel du couvert dans les phénomènes d'interception : saturation progressive du feuillage, action mécanique si l'averse se poursuit, évaporation de l'eau interceptée si l'averse s'arrête.

L'espèce joue un rôle déterminant : d'une façon générale, les résineux interceptent plus que les feuillus non seulement en hiver mais aussi en été ; ceci tient à l'importance du feuillage (index foliaire plus élevé).

L'ouverture du couvert a pour effet d'augmenter les précipitations au sol. Les résultats que nous avons obtenus montrent le rôle respectif des différents types d'ouverture des peuplements. Dans le cas des clairières

ou des bandes, le rapport $\frac{\text{diamètre (D) clairière}}{\text{hauteur peuplement (H)}}$ ou $\frac{\text{largeur bande (L)}}{\text{Hauteur peuplement (H)}}$ explique l'importance des précipitations au sol au-delà de $\frac{D}{H} > 2$ et $\frac{L}{H} > 1$ les précipitations au sol sont voisines de celles qui sont recueillies en plein découvert, sauf près des lisières Ouest.

L'étude de l'évapotranspiration réelle des peuplements fermés ou ouverts par des opérations sylvicoles a fait apparaître des différences importantes. En particulier, la clairière et la coupe rase se distinguent très nettement des peuplements fermés et présentent une évapotranspiration réelle beaucoup plus faible. Ce résultat tient au fait que, après la disparition de la végétation forestière, la recolonisation par les plantations et la végétation naturelle est lente. Dans la clairière de surcroît, nous avons pu montrer que l'évapotranspiration potentielle était plus faible qu'en plein découvert. La diminution peut atteindre 43 %. Cet abaissement du pouvoir évaporant de l'air se retrouve aussi dans les bandes forestières. Il s'agit d'un résultat intéressant car il fait apparaître un des caractères écologiques les plus importants des clairières et des bandes forestières : un microclimat hydrique favorable à la végétation en général et aux arbres en particulier.

Dans le cas des peuplements fermés, des différences existent aussi. Nous avons pu les expliquer par les situations par rapport à l'environnement et par des différences d'âge ou de taille.

L'interception représente une fraction importante qui peut aussi expliquer en partie les résultats obtenus. L'évapotranspiration réelle totale = évapotranspiration réelle peuplement + interception nette (I_n). En effet, I_n peut diminuer plus ou moins $E T R$ peuplement et bien entendu influencer $E T R$ total. Nos recherches ont montré que, une grande partie de l'eau interceptée était évaporée sans utilité pour les végétaux.

L'évaluation de l'évapotranspiration réelle est un problème difficile. Nous avons alors du mettre au point une méthode originale basée sur l'étude des nappes perchées temporaires. L'intérêt de notre méthode est de permettre d'évaluer directement $E T R$ sans utiliser $E T P$ comme c'est le cas dans certaines études similaires.

L'efficience de la transpiration est une notion importante pour la compréhension du fonctionnement des peuplements forestiers. Nous avons essayé de la calculer en effectuant le rapport :

$$\frac{\text{Accroissement courant (m}^3\text{/ha/an)}}{\text{Quantité d'eau consommée pendant la saison de végétation}}$$
 . Nous avons alors montré

que, parmi les espèces étudiées, les résineux étaient plus efficaces que les feuillus.

Les influences du couvert sur les facteurs climatiques retentissent sur l'ensemble de l'écosystème forêt. Ainsi, nous avons mis en évidence la relation qui paraît exister entre l'importance de l'écoulement le long des troncs et le type d'enracinement. D'un autre côté, nous avons montré comment la baisse du niveau évapotranspiratoire en favorisant la remontée des nappes perchées pouvait aboutir à une dégradation du sol en favorisant le développement d'espèces sociales acidifiantes.

- Influences des facteurs climatiques sur le développement et la croissance de quelques résineux

Ces modifications microclimatiques ne sont pas sans conséquences pour la vie des jeunes arbres et l'étude de ces phénomènes a fait l'objet de la deuxième partie de notre travail.

Ces modifications microclimatiques et particulièrement des régimes thermiques différents sont susceptibles d'entraîner des variations dans la date de débourrement. Les différences peuvent être importantes : jusqu'à 8 jours.

La croissance des arbres elle aussi est fortement influencée par les conditions microclimatiques.

La croissance en hauteur ou en diamètre traduit l'influence globale du milieu et bien entendu des facteurs climatiques dans leur effet d'ensemble. Nous avons pu montrer qu'il existait pour toutes les espèces envisagées ici, de grosses différences entre les 3 milieux que nous avons étudiés : la coupe d'abri, la clairière et la coupe rase. La croissance est très faible sous la coupe d'abri, moyenne dans la coupe rase et très bonne dans la clairière. Afin de mieux interpréter ces phénomènes de corrélation entre la croissance et les facteurs microclimatiques, nous avons analysé

séparément l'action de la température, de la lumière et de l'eau.

L'étude de l'effet de la température nous a permis de déterminer les seuils apparents de végétation des espèces étudiées : Abies alba Ecouves 5,2° C, Abies nordmanniana 6,2° C, Picea abies 4,1° C et Pseudotsuga menziesii 5,8° C.

L'établissement de courbes de croissance en fonction des sommes de température a fait apparaître des potentialités de croissance différentes pour les espèces envisagées ici. Le Douglas a la potentialité la plus grande, suivi de l'Epicéa et du Sapin pectiné. Le Sapin de Nordmann a la potentialité de croissance la plus faible.

L'étude des influences respectives de l'eau et de la lumière nous a apporté une meilleure compréhension du rôle réel des facteurs. Dans notre expérimentation, qu'avons-nous constaté ? :

- une croissance importante dans la clairière, moindre dans la coupe rase et très faible dans la coupe d'abri. Dans une première phase, on pourrait interpréter ce résultat comme résultant uniquement de l'influence de l'éclairement et dire que les espèces résineuses étudiées sont des espèces d'ombre qui ne supportent pas un éclairement élevé dans le jeune âge. La réalité est moins simple :

- dans un premier temps, dans le très jeune âge, les arbres ont d'abord des difficultés d'alimentation hydrique. En conséquence, leur croissance sera la plus forte (1) dans les stations où les conditions d'alimentation hydrique seront les plus favorables. Ces conditions reposent à la fois sur une bonne alimentation en eau du sol et sur un pouvoir évaporant de l'air modéré. Ces conditions existent dans la nature en relation avec des couverts forestiers plus ou moins importants, d'où la complexité des notions d'ombre et de lumière. Dans notre expérience, la clairière présente les conditions de croissance les plus favorables et effectivement, le développement des arbres est excellent.

(1) Il faut bien entendu que l'éclairement dépasse tout de même un certain seuil : au moins supérieur à 14 % de l'éclairement en plein découvert.

- Dans un deuxième temps, dès que l'alimentation hydrique des arbres devient correcte par suite du développement de leur système racinaire, le facteur limitant est la lumière. A ce moment là, les conditions de croissance deviennent meilleures dans la coupe rase. Ainsi, il apparaît que même dès le début de la plantation des arbres si l'alimentation hydrique est de toute façon satisfaisante, c'est la lumière qui est le facteur déterminant. La croissance est la plus élevée pour l'éclairement le plus fort.

Des différences de conditions microclimatiques entraînent chez les arbres des croissances différentes mais aussi des "adaptations" particulières de l'appareil foliaire. La forme et la structure des feuilles sont fortement influencées par les conditions microclimatiques. Mais il existe une grande variabilité au niveau individuel. Nous avons pu différencier chez Abies alba, Abies nordmanniana, Picea abies et Pseudotsuga menziesii trois grands types d'aiguilles caractéristiques du plein découvert, de la coupe d'abri et de la clairière. La diminution de l'éclairement se traduit par un aplatissement des aiguilles. Si l'on compare ces résultats avec ce qui existe dans un couvert forestier fermé, il est probable que l'on retrouvera ces trois grands types d'aiguilles de haut en bas des houppiers. L'effet du microclimat sur le nombre des dimensions des stomates n'a pas toujours été significatif.

A partir de l'ensemble des résultats, nous avons essayé d'apporter une contribution à la connaissance de l'écophysiologie des espèces étudiées. Ainsi, pour comprendre la biologie du Sapin pectiné, il est très important de distinguer deux notions importantes :

- d'une part la possibilité effective qu'il a de croître sous un éclairement faible ;
- d'autre part, la nécessité d'un bon équilibre hydrique.

Cela explique le fait que cette espèce pousse beaucoup mieux dans les clairières ou toute autre situation abritée (lisière par exemple) qu'en plein

découvert ; de là est né la confusion entre besoins en lumière et besoins en eau. En réalité, si l'alimentation en eau est bonne, le développement sera meilleur dans les situations de plein découvert.

L'Epicéa commun, par contre, ne se comporte pas du tout comme une essence d'ombre.

L'ensemble des résultats obtenus nous permettent d'envisager des applications sylvicoles.

Dans le cas des techniques de régénérations du peuplement, deux notions importantes et parfois contradictoires doivent être distinguées :

- préserver les jeunes plants des accidents climatiques ;
- améliorer les conditions générales de développement et de croissance.

Dans bien des cas, ces deux notions essentielles ont été confondues au détriment des jeunes régénérations.

Les résultats obtenus au cours de notre étude nous permettent de préconiser un mode d'action :

- d'une manière générale, la coupe d'abri constitue une solution peu satisfaisante ;

- s'il s'agit d'espèces forestières présentant une sensibilité importante aux gelées tardives (Sapin pectiné, Douglas) il faut utiliser la technique des clairières qui diminuent le risque de gelées tardives et présentent des conditions microclimatiques favorables à la croissance ;

- s'il s'agit d'espèces non sensibles aux gelées, il est possible d'utiliser les bandes forestières qui présentent des conditions de croissance favorables, et dont les largeurs peuvent être modulées en fonction du tempérament des essences introduites.

Pour les espèces que nous avons étudiées et dans les conditions climatiques générales de notre expérimentation, nous pouvons dire que l'éclairement relatif de départ doit être compris entre 15 et 50 %. Il doit être porté à 100 % dès 6 à 7 ans après la plantation pour l'Epicéa, le Douglas, le Sapin de Nordman et 10 ans pour les Sapins pectinés.

Dans le cas où la plantation ne peut s'effectuer qu'en coupe rase, des recommandations peuvent être faites. S'il s'agit d'espèces à croissance lente au départ (Sapins), il est opportun de laisser la végétation naturelle (strate herbacée) recouvrir les plants à la plantation. Il est simplement nécessaire d'effectuer un dégagement au moment de l'émergence des plants. Dans le cas où on a affaire à une espèce à croissance rapide (Douglas), il est préférable de ne maintenir qu'un tapis herbacée aussi réduit que possible.

Les résultats de nos travaux nous permettent aussi d'apporter une contribution à l'aménagement raisonné des bassins versants boisés. Il est possible de diminuer et de moduler le niveau évapotranspiratoire en jouant sur la structure et la densité des peuplements. L'aménagement devrait aussi s'orienter vers l'utilisation d'espèces qui ont une bonne efficacité transpiratoire.

B I B L I O G R A P H I E

- ACADEMIE DES SCIENCES DE L' U.R.S.S. 1967 .- Régime de la lumière. Photosynthèse et rendement de la forêt. Edition Nanka, Moscou, 274 p.
- ANDERSON (H.W.) 1956 Forest cover effects on snowpack accumulation and melt. Central Sierra Snow Laboratory, Trans. Amer. Geophysys. Un., 37, pp. 307-312
- ANDERSON (R.C.), LOUCKS (O.L.), SWAIN (A.M.) 1969 .- Herbaceous response to canopy cover, light intensity and throughfall precipitation in coniferous forest. Ecology, vol. 50, (2) pp. 255-263
- ARBEZ (M.) 1969 Comportement en pépinière de quelques provenances françaises de sapin. Critique d'une notion traditionnelle du sapin de l'Aude. R.F.F. XXI, 5, pp. 353-361
- ARENA (M.) 1960 Anatomia comparativa de alcuni organi vegetative de Abies nebrodensis (Lojac) Mattei e Abies alba Mill. Atti. Acad. naz. Lincei. Rc., Ser. VIII cl. Sci. fis. matemat 29, pp. 586-596
- AUSSENAC (G.) 1968 Observations sur les variations microclimatiques verticales dans un peuplement de Pins Sylvestres. Document Station de Sylviculture et de Production, 11 p.
- AUSSENAC (G.) 1968 Observations sur les effets d'une gelée tardive. R.F.F. 3 pp. 204-211
- AUSSENAC (G.) 1968 Interception des précipitations par le couvert forestier. Ann. Sci. Forest. 25 (3), pp. 135-156
- AUSSENAC (G.) 1969 Production de litière dans divers peuplements forestiers à l'Est de la France. Oecologia Plantarum IV, pp. 225-236
- AUSSENAC (G.), PARDE (J.) 1969 .- Forêts et climats. B.T.I.
- AUSSENAC (G.) 1970 Action du couvert sur la distribution au sol des précipitations. Ann. Sci. Forest. 27, (4), pp. 389-399
- AUSSENAC (G.) 1970 Gelées tardives et peuplements forestiers. R.F.F. XXII, 4, pp. 463-469
- AUSSENAC (G.) 1970 Aperçu du rôle de la forêt dans l'économie de l'eau. R.F.F. XXII, 6, pp. 603-618

- AUSSENAC (G.) 1972 Etude de la transpiration et de la croissance de jeunes Epicéas (Picea abies Karst) cultivés en case de végétation dans des conditions microclimatiques différentes. Document Station de Sylviculture et de production, 9 p.
- AUSSENAC (G.), BONNEAU (M.), LE TACON (F.) 1972 .- Restitution des éléments minéraux au sol par l'intermédiaire de la litière et des précipitations dans quatre peuplements forestiers de l'Est de la France. Oecologia Plantarum, 7, pp. 1-21
- AUSSENAC (G.) 1972 Climat, microclimat et production ligneuse. Ann. Sci. Forest. 30 (3) pp. 239-258
- AUSSENAC (G.) 1972 Etude de l'évapotranspiration réelle de quatre peuplements forestiers dans l'Est de la France. Ann. Sci. Forest. 29 (3) pp. 369-389
- AUSSENAC (G.), BECKER (M.), BONNEAU (M.) 1972 .- Connaissance de la forêt et aménagement de l'espace naturel. R.F.F. XXIV, 4, pp. 244-255
- AUSSENAC (G.) 1973 Etude des gelées tardives en relation avec les problèmes de reboisement. Ann. Sci. Forest. 30 (2), pp. 141-155
- AUSSENAC (G.) 1973 Effets de conditions microclimatiques différentes sur la morphologie et la structure anatomique des aiguilles de quelques résineux. Ann. Sci. Forest. 30 (4), pp. 375-392
- AUSSENAC (G.) 1973 Etude microclimatique de coupes par bande en forêt d'Epinal. Comparaison avec la coupe rase. R.F.F. XXIV, 4, pp. 283-293
- AUSSENAC (G.) 1974 Etude de la croissance en hauteur chez quelques résineux. Effet de la température. Ann. Sci. Forest. (sous presse)
- BAUMGARTNER (A.) 1967 Energetic bases for differential vaporization from forestand agricultural lands. In Forest Hydrology, pp. 381-390. Pergamon Press Oxford
- BECKER (M.) 1971 Etude des relations sol végétation en conditions d'hydromorphie dans une forêt de la plaine lorraine. Thèse Université de Nancy, 225 p.
- BERNARD (E.) 1945 Le climat écologique de la cuvette congolaise. INEAC. VII pp. 125-181

- BIDABE (B.) 1967 Action de la température sur l'évolution des bourgeons de pommier et comparaison des méthodes de contrôle de l'époque de floraison. Annales de Physiologie Végétale, 9 (1), pp. 65-86
- BOCHKOV (A.P.) 1970 Influence des forêts sur le débit des cours d'eau. Nature et Ressources. (UNESCO) VI, 1, pp. 11-13
- BODROFF (V.) 1934 The influence of the shelterbelts over the microclimate of adjacent territories. Journal of Forestry, 34, 1, pp. 696-697
- BORMANN (F.H.) 1958 The relationships of ontogenetic development to photosynthesis in Pinus taeda seedlings. In the physiology of forest trees, pp. 197-215. Thimann Ronald Press, New York
- BOUCHET (R.J.) 1964 Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. Ann. Agron., 4, 5, pp. 743-824
- BOUCHET (R.J.) 1965 Problèmes des gelées de printemps. Agricultural Meteorology, 2, pp. 167-195
- BOYER (W.D.) Shoot growth patterns of young Loblolly Pine. Forest Science, 16, 4, pp. 472-482
- BOYSEN JENSEN (R.R.) 1932 .- Die Stollproduktion der Pflanzen Gustav-Fischer, Verlagsbuchhandlung Jena, Germany
- BRAZIER (C.E.), EBLE (L.) 1934 .- Introduction à l'étude des températures de l'eau et du sol au voisinage de la surface terrestre. La Météorologie 97 p.
- BRETCHER (H.M.) Methodische Beiträge zur Erfassung der Wechselwirkung zwischen Wald und Wasser. Forst. Archiv., 35 (11), pp. 229-241
- BRETCHER (H.M.) 1965 Methods of Studying forest-water relationships in a 120 year old Scots' pine stand. Forstarchiv, 35, 11, pp. 229-241
- BRIX (M.) 1962 The effect of water stress on the rates of photosynthesis and respiration in tomato plant and loblolly pine seedlings. Physiol. Plant., 15, pp. 10-20
- BROCHET (N.), DURAND (R.), GERBIER (N.) 1971 .- Recueil des données agroclimatologiques. Sommes de température. Monographie 83 de la Météorologie Nationale, p. 144

- BROWN (J.H.), BOURN (T.G.) .- Patterns of soil moisture depletion in a mixed Oak stand. Forest Science, 19, 1, pp. 23-30
- BURGER (H.) 1954 Der Einfluss des Waldes auf den Wasserhaushalt. Mémoires de l'Institut Suisse de Recherches Forestières, Bol. XXXI, Heft 1
- BYRAM (G.M.), DOOLITTLE (W.T.) 1950 .- A year of growth for a shortleaf pine. Ecology, 31, 1
- CACHAN (P.) 1963 Signification écologique des variations micro-climatiques verticales dans la forêt sempervirente de Côte d'Ivoire. Ann. Fac. Sciences. Dakar 8, pp. 89-155
- CHAMPAGNAT (P.) 1969 Croissance morphogénèse et développement. In Biologie végétale, 1, 259. Masson Paris
- COOK (B.D.) Five seasons growth of Conifer. Ecology, 22, 3, pp. 285-296
- COSTIN (A.B.), WIMBUSH (D.J.), CROMER (R.N.) 1964 .- Studies in catchment hydrology in the Australian Alps. 5. Soil moisture characteristics and evapotranspiration. Australia, C.S.I.R.O., Dis., Plantand. Tech. Paper, 20, 20 p.
- CUIF (E.) 1909 Influence du couvert de la forêt sur la température du sol à diverses profondeurs. Bulletin des séances de la Société des Sciences de Nancy, 1 - 19
- CUIF (E.) 1912 Action de la forêt sur les gelées tardives. Annales de la Science Agronomique Française. 6 p.
- CUIF (E.) 1913 Météorologie comparée agricole et forestière. Bulletin des séances de la Société des Sciences de Nancy, pp. 1-78
- DAGUILLON (A.) 1890 Recherches morphologiques sur les feuilles de conifères. Thèse Paris, Klincksieck 85
- DEBAZAC (E.F.) 1964 Manuel des conifères. E.N.G.R.E.F. Nancy, 172 p.
- DEBAZAC (E.F.) 1965 Observations sur le débourrement et la croissance en longueur de quelques espèces de sapin. R.F.F. n° 2, pp. 121-130
- DECOURT (N.) 1971 Comparaison des équations de régression. Application au cubage des peuplements d'Epicéa commun. Ann. Sci. Forest. 28/11, pp. 51-58

- DE CRECY (L.) 1968 Influence de la forêt sur des crues d'origines nivales et possibilités d'action sur ces crues par les techniciens forestiers. 9. Soc. Hydrotechnique de France - Xe Journées de l'hydraulique. Paris.
- DOUGLASS (J.E.) 1967 Effects of species and arrangement of forests on evapotranspiration. In "Forest Hydrology" (W.E. Sopper and H.W. LULL, eds) p. 451. Pergamon Oxford
- DUFF (G.M.), NOLAN (N.) 1953 .- Growth and morphogenesis in the canadian forest species. I The controls of cambial and apical activity in Pinus resinosa Ait. Canadian Journal of Botany, 31, pp. 471-513
- DUFF (G.M.), NOLAN (N.) 1957 .- Growth and morphogenesis in the canadian forest species. II Specific increments and their relation to the quantity and activity of growth in Pinus resinosa Ait. Canadian Journal of Botany, 32, pp. 527-572
- DUCHAUFOR (PH.) 1960 Précis de Pédologie. Masson, 438 p.
- DUCHAUFOR (PH.) 1972 Processus de formation des sols. C.R.D.P. Nancy 182 p.
- DUFOR (L.) 1887 Influence de la lumière sur la forme et la structure des feuilles. Thèse Paris, Masson, 413 p.
- DUNIKOWSKI (S.) 1965 Etudes sur la formation des conditions thermiques de certains milieux forestiers du parc national de Bialowieza. Ministerro Lesnietwa. Institut Badawczy Lecnictwa, pp. 3-123
- DURAND (R.) 1965 Le risque de gelée, application aux poiriers dans la région parisienne. Phytoma, Novembre, pp. 35-41
- DURAND (R.) 1967 Action de la température et du rayonnement sur la croissance. Ann. Physiol. Vég., 9 (1), pp. 5-27
- DURAND (R.), DE PARCEVEAUX (S.), ROQUE (P.) 1967 .- Action de la température sur la croissance et le développement du lin. Annales de Physiologie Végétale, 9 (1), pp. 87-105
- DUVIGNEAUD (P.) 1971 Concepts sur la productivité primaire des écosystèmes forestiers. UNESCO - Actes du Colloque de Bruxelles 1969, pp. 111-140
- ECKARDT (F.E.) 1966 Le principe de la soufflerie climatisée appliquée à l'étude des échanges gazeux de la couverture végétale. Oecologia Plantarum 1, 4, pp. 369-399

- EIDMANN (F.E.) 1959 Die Interception in Buchen und Fichtenbeständen, Ergebnisse mehrjähriger Untersuchungen in Rothaargebirge (Sauerland). Ass. International. Hydrol. Sci. 48, 526, Colloque Hannoversch-Münden.
- ESCHNER (A.E.) 1967 Interception and soil moisture distribution. International. Symp. Forest Hydrol., pp. 195-199. Pergamon Press. New York
- FAIRBAIRN (W.A.), NEUSTEIN (S.A.) 1970 .- Study of response of certain coniferous species to light intensity. Forestry 43 (1) pp. 57-71
- FAUTRAT(M.) 1878 Observations météorologiques faites de 1877 à 1878. Paris Imprimerie Nationale 1878, pp. 1-52
- FOURT (D.F.), HINSON (W.H.) 1970 .- Water relations of tree crops, A comparison between Corsican Pine and Douglas Fir in Southeast England. J. appl. Ecol. 7, 2, pp. 295-309
- FRECHETTE (M.F.) 1969 Interception de la pluie par une sapinière laurentienne. Naturaliste Canad., 96, pp. 523-529
- FREELAND (R.O.) 1952 Effect of age of leaves upon the rate of photosynthesis in some conifers. Plant. Physiol., 27, pp. 685-690
- GALOUX (A.) 1971 Flux et transferts d'énergie au niveau des écosystèmes forestiers. UNESCO - Actes du Colloque de Bruxelles (1969), pp. 21-37
- GARNIER (M.) 1954 Contribution à l'étude des gelées en France. La Météorologie, décembre, pp. 369-378
- GATTI (F.) 1970 Il riconoscimento di alcune provenienze di Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco en base alle caratteristiche anatomiche degli aghi. Ann. Inst. Sper. Silvicolt., 1, pp. 327-341
- GEIGER (R.) 1965 The climate near the ground 611. Haward University Press. Cambridge.
- GESLIN (H.) 1939 La lutte contre les gelées et les seuils de résistance des principales cultures fruitières. Annales des Epiphyties, T.V, fasc. 1, pp. 7-19
- GESLIN (H.) 1944 Etude des lois de croissance d'une plante en fonction des facteurs du climat. Thèse Faculté Sciences Paris, 115 p.
- GESLIN (H.) 1958 Situations gelives. Bulletin Technique d'Information, 135, p. 12

- GINDEL (I.) 1969 Stomatal number and size as related to soil moisture in tree xerophytes in Israel. Ecology, 50, 2, pp. 263-267
- GODARD (M.), NIGOND (J.) 1954 .- Les gelées de printemps à l'Ecole Nationale d'Agriculture de Montpellier. La Météorologie, décembre, pp. 320-344
- GOODELL (B.C.) 1959 Management of forest stands in Western United States to influence the flow of snow-fed streams. ASS. Int. Hydro. Sci. Coll. Hannoversch-Münden
- GOODELL (B.C.) 1967 Watershed treatment effects on evapotranspiration. In "Forest Hydrology" (W.E. Sapper and H.W. Lull eds) p. 477, Pergamon Oxford
- GUYOT (M.) 1963 Brise vent. Modification des microclimats et amélioration de la production agricole. In l'eau et la production végétale. Paris INRA pp. 245-302
- HALLAIRE (M.) 1964 L'eau et la production végétale. B.T.I. 189, pp. 1-23
- HAMILTON (E.L.), ROWE (P.B.) 1949 .- Rainfall interception by Chaparral in California. California forest range experiment station. 32 p.
- HELLMERS (H.), GENTHE (M.K.), RONCO (F.) 1970 .- Temperature affects growth and development of Engelmann Spruce. Forest Science, 16, 4, pp. 447-452
- HETHD, KARSCHON (R.) 1963 .- Interception of rainfall by Eucalyptus camaldulensis Dehn. Contribution on Eucalyptus in Israel, II, pp. 7-12
- HIBBERT (A.R.) 1967 Forest treatment effects on water yield. In "Forest Hydrology", pp. 527-543. Pergamon Press. Oxford
- HIRATA (T.) 1929 Contribution to the problem of the relation between forest and water in Japan. Imp. Forestry Expt. Sta. (Meguro, Tokyo) 41 pp.
- HODGES (J.D.), SCOTT (D.R.M.) 1968 .- Photosynthesis in seedling of six conifer species under natural environmental conditions. Ecology, 49, 5, pp. 973-981
- HOLSTENER-JORGENSEN (H.) 1959 .- A contribution to elucidation of evapotranspiration of forest stands on clayey soils with a high water-table. Publ. Intern. Associa. Sci. Hydrol. 48, 286 p.

- HOLSTENER-JORGENSEN (H.) 1961 .- An investigation of the influence of various tree species and the ages of the stands on the level of the ground water table in forest tree stands at Bregentved. Forstlige Forsksvaesen Danmark 27, 233 p.
- HOLSTENER-JORGENSEN (H.) 1967 .- Influences of forest management and cutting on ground water fluctuations. In "Forest Hydrology" (W.E. Sopper and H.W. Lull, eds), p. 325. Pergamon Oxford
- HOOVER (M.), DAVID (F.O.), GREENE (G.E.) 1953 .- Soil moisture under a young loblolly pine plantation. Soil Sci. Soc. Proc., 17, pp. 147-150
- HOOVER (M.D.) 1962 Action et mouvements de l'eau dans la forêt. In "Influences exercées par la forêt sur son milieu" F.A.O., pp. 37-91
- HOOVER (M.), LEAF (G. CH.) 1966 .- Process and significance of Interception in Colorado Subalpine Forest. International Symposium on Forest Hydrology, pp. 213-223. Pergamon Press. Oxford
- HUBER (B.) 1932 Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftströme. Ber. Deut. Botan., pp. 50-89
- JACKSON (L.W.R.) 1967 Effect of shade on leaf structure of deciduous tree species. Ecology, pp. 498-499
- JOZEFACINK (W.) 1962 Observations on the influence of meteorological conditions on the height increment of Forest trees. In J. Biometeor., V 1, 1, pp. 55-61
- KALMA (J.D.), STANHILL (C.), URIELLI (E.) 1968 .- Rainfall interception and stemflow in an orange plantation. Israel Journal of Agricultural Research, 18, 1, pp. 1-13
- KARSCHON (R.) 1965 Pennisetum purpureum Schum. comme brise vent. IUFRO - 12e Congrès Oxford
- KEINHOLZ (R.) 1934 Leader, needle, cambial and root growth of certain conifer and their relationship. Bot. gaz., 96, pp. 73-92
- KITTREDGE (J.) 1948 Forest Influence. 394 Mc Grawhill Book, Co. New York
- KITTREDGE (J.), LOUGHEAD (H.J.), MAZURAK (A.) 1961 .- Interception and stemflow in a Pine plantation. J. Forest., 49, pp. 505-522
- KOMISSAROV (D.A.), SHTEJNVOLF (L.P.) 1967 .- Intensité de la photosynthèse d'un sous-bois d'épicéa dans diverses conditions écologiques. Sveton. Rezhim, Fotos, i-Produktivn. Jesa, pp. 243-253

- KOSTLER (J.N.), BRUCKNER (E.), BIBELRIETHER (H.) 1968 .- Die Wurzeln der Walbäume. Untersuchungen zur Morphologie der Waldbaume in Mitteleuropa. Verlag Paul Parey. Hamburg und Berlin, pp. 32-33
- KOZLOWSKI (T.T.), WARD (R.C.) 1961 .- Shoot elongation characteristics of forest trees. Forest Science, 7, pp. 357-368
- KRECMER (V.) 1968 Zir Interzeption der Niederschläge in Fichtenbestand einer Mittelgebirgslage. Opera Corcontica 5, pp. 83-96
- KRECMER (V.), FOST (W.) 1970 .- Strip clearcutting microclimate. Scientia agricultura Bohemoslovaca, 1, pp. 64-78
- LADEFOGED (K.) 1960 A method for measuring the water consumption of large intact trees. Physiol. Plantarum, 13, p. 648
- LADEFOGED (K.) 1963 Transpiration of forest trees in closed stands. Physiol. Plantarum, 16, p. 378
- LANNER (M.R.) 1964 Temperature and the diurnal rythm of height growth in Pines. Journal of Forestry, 62, 7, pp. 493-495
- LAW (F.) 1958 Measurement of rainfall, interception and evaporation losses on a plantation of Sitka Spruce trees. Ass. Inter. Hydro. Sci., n° 44, Gent Brugge
- LEONARD (R.E.) 1961 Net precipitation in a Northern Hardwood Forest. J. GEOPHY. Research., 66, (8), pp. 2417-2421
- LEVY (G.) 1969 Premiers résultats d'étude comparée de la nappe temporaire des pseudogleys sous résineux et sous feuillus. Ann. Sci. Forest., pp. 65-79
- LULL (H.W.), AXLEY (J.H.) 1958 .- Forest soil moisture relations in the Coastal Plain Sands of Southern New-Jersey. Forest Science, 4, 1, pp. 2-19
- MARSHALL (D.C.) 1958 Measurement of sap flow in conifers by heat transport. Plant Physiol., 33, pp. 385-396
- MARTINELLI (M.J.) 1966 Possibilities of snowpack management in Alpine areas. International Symposium on Forest Hydrology. pp. 225-231. Pergamon Press, Oxford
- MATHIEU (M.) 1865 Météorologie agricole et forestière. Paris Imprimerie Nationale
- MER (M.E.) 1883 De l'influence de l'ombre et de la lumière sur la structure et la végétation des aiguilles d'Abies excelsa. Bull. Soc. Bot. Fr., 30, 2, pp. 40-50

- MILLER (D.H.) 1966 Sources of Energy for Thermodynamically caused Transport of Intercepted snow from Forest Crowns. International Symposium on Forest Hydrology, pp. 201-211. Pergamon Press. Oxford
- MITSCHERLICH (G.), MOLL (W.) 1970 .- Recherches sur les précipitations et l'humidité du sol dans quelques peuplements résineux et feuillus des environs de Fribourg-en-Brisgau. 1ère partie : précipitation. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, 3, pp. 49-60
- MOLCHANOV (A.A.) 1963 The hydrological rôle of forests. Israël Program for Scientific Translation Jérusalem, 405 p.
- NAEGELI (W.) 1940 Licht messungen in Freiland und geschlossenen. Altholzbeständen Zurich
- NAPP-ZINN (K.) 1966 Anatomie des Blattes. I Gymnosperm. 369. Gebrüder Borntraeger. Berlin.
- NOIRFALISE (A.) 1962 Influence de quelques types de forêts sur le bilan des eaux d'infiltration. 10. La Technique de l'Eau
- OVINGTON (J.D.) 1954 A comparaison of Rainfall in Different Woodlands. Forestry, 27, pp. 41-51
- PARCEVAUX (DE) 1963 Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu. Ann. Agron., 14, (5), pp. 655-742
- PARDE (J.) 1961 Dendrométrie. E.N.G.R.E.F. NANCY, 350 p.
- PARDE (J.) 1974 Le microclimat en forêt. In Ecologie Forestière, pp. 1-19, Gauthiers-Villars, Paris
- PARKER (J.) 1957 The tent leaf method and estimations of diurnal trends in transpiration from different heights and sides of an oak and a pine. Botan. Gaz., 119, 93
- PATRIC (J.H.) 1961 The San Dimas large lysimeters. J. Soil Water Conserv. 16, 19
- PAVARI (A.) 1962 Influences exercées par la forêt sur son milieu. F.A.O. 1962 341 (Introduction 33)
- PEIREIRA (H.C.), HOSEGOOD (P.H.) 1962 .- Comparative water use of softwood plantations and bamboo forest. J. Soil. Sci. 13, 299
- PERRIN (H.) 1963 Sylviculture T. 1. Bases scientifiques de la sylviculture. E.N.E.F. Nancy 318

- PISEK (A.), TRANQUILLINI (W.) 1951 .- Transpiration and Wasserhaushald der Fichte (*Picea excelsa*) bei zunehmender Inft. und Bodentrochenheit. Physiol. Plantarum 4, 1.
- PISEK (A.), WINKLER (E.) 1959 .- Licht und temperaturabhängigkeit der CO₂ Assimilation von Fichte (*Picea excelsa* Link), Zirbe (*Pinus cembra* L.) und Sonnenblume (*Helianthus annuus* b.). Planta 53, pp. 532-550
- POLSTER (H.) 1950 Die Physiologischen Grundlagen der Stofferzeugung in Walde, Bayer. Landwirtschafts. Verlag. Munchen
- PONCELET (L.) 1959 Sur le comportement des pluviomètres. Publication n° 10, Série A, 58. Inst. r. Météorol. Belg.
- PONCELET (L.) 1962 Comportement expérimental d'un écran de protection aérodynamique pour pluviomètre. Publication n° 26, Série A, 14, Inst. R. Météorol. Belg.
- PONCET (A.) 1968 Influence de la forêt sur les crues d'origines fluviales et possibilités offertes par le reboisement et par la gestion forestière pour le contrôle des crues. 9. Soc. Hydrotechnique de France - Xe journées de l'Hydraulique. Paris
- REINHART (K.G.), ECHNER (A.R.) 1962 .- Effect on stream-flow of four different forest practices in the Alleghany Mountains. J. Geophy. Res., 67, 2433
- REYNOLDS (E.C.), LEYTON (L.) 1963 .- Measurements and significance of through fall in forest stands. In the Water Relations of Plants. Oxford, Blackwell, Scientific Publications 1963, pp. 127-141
- REYNOLDS (E.R.C.), HENDERSON (C.S.) 1967 .- Rainfall interception by Beech, Larch and Norway Spruce. Forestry, 40, (2), pp. 165-184
- RICKLEFS (R.E.) 1967 A graphical method of fitting equations to growth curve. Ecology, 48, (6), pp. 978-983
- ROBERTSON 1908 Archiv für Entwicklungsmesh Org. 25, 181
- ROGERSON (T.L.) 1967 Throughfall in pole sized Loblolly pine as affected by stand density. In "Forest Hydrology" (W.E. Sopper and H.W. Lull, eds). pp. 187-190. Pergamon Oxford
- ROUSSEL (L.) 1963 Recherches théoriques et pratiques sur la répartition en quantité et en qualité sur la lumière dans le milieu forestier ; influence sur la végétation. A Ann. Ec. Nation. Eaux et forêts. 13, 2, pp. 295-385
- ROUSSEL (L.) 1962 Etude théorique élémentaire de la trouée et de la bande. Soc. Forest. Franche Comté., 2, 32, pp. 552-560

- ROUSSEL (L.) 1970 La notion de niveau d'énergie et son utilisation en sylviculture. R.F.F., 2, pp. 131-138
- ROUSSEL (L.) 1972 Photologie forestière, 144, Masson, Paris
- RUTTER (A.J.) 1964 Studies in the water relations of Pinus Sylvestris in plantation condition. 2. The annual cycle of soil moisture change and derived estimates of evaporation. J. Appl. Ecology., 1, 29
- RUTTER (A.J.) 1966 Studies in the water relation of Pinus Sylvestris in plantation condition. 4. Direct observations on the rates of transpiration, evaporation of intercepted water, and evaporation from the soil surface. J. Appl. Ecology., 3, 393
- RUTTER (A.J.) 1967 An analysis of evaporation from a stand of Scots pine. In "Forest Hydrology" (W.E. Sopper and H.W. Lull, eds) Pergamon Oxford. pp. 403-418
- RUTTER (A.J.) 1968 Water consumption by forests. In Water deficits and Plant growth., 2, pp. 23-84. Acad. Press. Inc. New York
- SACHORI (A.), ROSENZWEIG (D.), POLJAKOFF-MAYBER (A.) 1967 .- Effects of Mediterranean vegetation on the moisture regime. In "Forest Hydrology". Pergamon Press, Oxford, pp. 291-311
- SAUGIER (B.) 1970 Transports turbulents de CO₂ et de vapeur d'eau au-dessus et à l'intérieur de la végétation. Méthodes de mesures micrométéorologiques. Oecologia Plantarum, 5, 2, pp. 180-223
- SCHNOCK (A.), GALOUX (A.) 1967 .- Recherches sur l'Ecosystème forêt. Réception de précipitation et égouttement. Bull. Inst. Rech. Sci. Nat. Belg., 30, 43, 33 30 p.
- SCHNOCK (G.) 1967 Recherches sur l'Ecosystème forêt. Série B : la chênaie mélangée calcicole de Virelles Blaimont. Contribution n° 17. Réception des précipitations et écoulement le long des troncs en 1966. Bull. Inst. Sci. Nat. Belg. 43, 37 15 p
- SCHNOCK (G.) 1967 Recherches sur l'Ecosystème forêt. Série B : la chênaie mélangée calcicole de Virelles-Blaimont. Contribution n° 11. Cours annuel de la température de l'habitat (Sol et Atmosphère) et période de végétation (1965). Bull. Inst. R. Sci. Nat. Belg., 43, 35, pp. 2-15
- SCHNOCK (G.) 1970 Le bilan d'eau et ses principales composantes dans une chênaie mélangée calcicole de Haute Belgique (Bois de Virelles Blaimont). Thèse Université Libre de Bruxelles. 352

- SCHNOCK (G.) 1971 Le bilan d'eau dans l'écosystème forêt. Application à une chênaie mélangée de Haute Belgique. UNESCO. Actes du Colloque de Bruxelles 1969, pp. 41-46
- SCHOCH (P.G.) 1972 Variation de la densité stomatique de Capsicum annum L. en fonction du rayonnement global. C.R. Acad. Sc. Paris., 274, pp. 2496-2498
- SELTZER (P.) 1935 Etudes micrométéorologiques en Alsace. Thèse Université de Strasbourg. 57.
- SEPPANEN (M.) 1959 On the Quantity of snow lodging, on branches of trees in pine domined forest on January 16. 1959 during the time of snow destruction in Finland. Ass. Internat. Hydrol. Sci. 48, pp. 245-247. Colloque Hannoversch Münden.
- SHACHORI (A.Y.), STANHILL (G.), MICHAELL (A.) 1965 .- The application of Integrated research approach to the study of effect of different cover types on rainfall disposition in Carmel Mountain in Israël. Arid Zone Res. 25, 479
- SOKOLOVA (L.M.) 1967 Eclaircissement et photosynthèse d'une régénération de Pins sous couvert de pins dans la région de Moscou. Svelov Rezkim. Fotos i Produkriyu Lesa, pp. 255-260
- STONE (E.C.) 1958 Dew Absorption by conifers. In "the Physiology of Forest Trees" (K.V. Thimann, ed), p. 25. Ronald Press New York
- STOUT (B.B.) 1956 Studies on the root systems of deciduous trees. Black Rock Forest Bul., pp. 15-45
- STOUT (B.B.), Mc MAHON (R.J.) 1961 .- Throughfall Variation under tree Crown. J. Geophy. Research., 66, (6), pp. 1830-1843
- SWANSON (R.H.) 1967 Seasonal course of transpiration of Lodgepole Pine and Engelmann Spruce. In "Forest Hydrology", pp pp. 419-434. Pergamon Press Oxford
- THORUD (M.) 1967 The effect of applied interception on transpiration rates of potted Ponderosa Pine. Water Ressources Res., 3, 2, pp. 443-450
- TRANQUILLINI (W.) 1954 Die Lichtabhängigkeit der Assimilation von Sonnen und Schattenblättern eine Buche unter Okologischen Bedingungen. 8ème Inst. Bot. Congr. Paris. Sec. 13, pp. 100-102
- TOUTAIN (F.) 1965 Etude du sol et de la forêt de Fougères (I et V). Thèse de 3e cycle. Université de Paris. 192 p.
- TRONCHET (A.), GRANGIRARD (A.) 1956 .- L'analyse histométrique et son application à l'écologie forestière. Ann. Sci. Univ. Besançon. 2e Ser. Bot. Fasc. 8, 330

- URIE (D.H.) 1959 Pattern of soil moisture depletion varies between Red Pine and oak stands in Michigan. U.S. Depart. Agri. Forest Serv. Latie States Forest Exp. Sta. 564
- VAN DER LINDE (R.J.) 1962 .- Arbres hors forêts. In FAO : Influences exercées par la forêt sur son milieu. pp. 159-231
- VEZINA (P.E.) 1960 Recherches sur les conditions de lumière et de précipitations dans les forêts traitées par la coupe progressive par groupes. Mémoires Institut de Recherches Forestières XXXVI, 2, pp. 33-137
- VITON (P.) 1970 Pluviomètres et pluviographes utilisés par la Météorologie Nationale. In Techniques d'Etude des facteurs physiques de labiosphère. pp. 246-256. INRA Paris
- VOIGT (G.K.) 1960 Distribution of Rainfall under Forest Stand. Forest Science, 6, (1), pp. 1-10
- WALTERS (J.), SOOS (J.) 1963 .- Shoot growth patterns of some British Colombia Conifers. Forest Science, 9, (1), pp. 73-85
- WASSINK (E.C.), RICHARDSON (S.D.), PETERS (G.A.) 1956 .- Photosynthetic adaptation to light intensity of leaves of Acer pseudoplatanus. Acta Bot. Neerland., 5, pp. 247-256
- WILM (H.C.), DUNFORD (E.G.) 1948 .- Effect of timber cutting on water available for stream flow from a lodgepole pine forest Washington. D.C. U.S. Dept. Agri. Techn. Bull. 968, 43 p.
- WIND (R.) 1958 The lysimeters in the Netherlands. Proc. and Jnf. of the Committee on Hydr. Research. T.N.O., n° 3
- WORRALL (J.) 1973 Seasonal, daily and hourly growth of height and radius in Norway Spruce. Canadian Journal of Forest Research., 3, pp. 501-511
- ZAHNER (R.) 1953 Soil water depletion by pine and hardwood stands during a dry season. Forest Science, 1, 4, pp. 258-265
- ZAHNER (R.) 1958 Hardwood understory depletes soil water in pine stands. Forest science, 4, 3, pp. 178-184
- ZIEGLER (J.) 1879 Uber phanologische Beobachtungen und termiche vegetations. Konstanten Ziver Vortrage Jahresberd. Senkenberf. naturforeh. ges. Frankfurt.
- ZINKE (P.J.) 1961 Patterns of soil properties developped under the influence of forest trees. XI. Interna. Botanical Congress II, pp. 1641-1646
- ZINKE (P.J.) 1967 Forest interception studies in the United States. Forest Hydrology. Pergamon Press Oxford., pp.137-161

TABLEAU ANNEXE N°1

COMPARAISON DES TEMPERATURES DE L'AIR DANS DIFFERENTS TRAITEMENTS

Mois	Tempé- rature	1967						1968					
		Coupe rase	Coupe d'abri	Clai- rière	Pin Sylv.	Sapin de Vancouv.	Epicéa	Coupe rase	Coupe d'abri	Clai- rière	Pin Sylv.	Sapin de Vancouv.	Epicéa
J A N V	Max. Min. Moy.							2,8 2,6 0,1	2,2 -2,0 0,1	2,6 -2,1 0,2	2,9 -2,2 0,3	2,0 -2,1 -0,0	2,1 -2,2 -0,0
F E V	M m Moy							5,6 -0,2 2,6	5,0 0,3 2,6	5,6 0,0 2,8	5,3 -0,2 2,5	4,5 0,2 2,3	4,3 0,1 2,2
M A R S	M m Moy							9,9 2,2 6,1	9,7 1,7 5,7	10,1 1,3 5,7	9,4 1,1 5,2	8,9 1,7 3,3	8,9 1,6 5,2
A V R	M m Moy	13,3 1,4 7,3	12,9 2,2 7,6	13,2 1,9 7,6	12,4 1,9 7,1	11,5 2,2 6,9	11,6 1,6 6,6	15,4 3,7 9,6	14,7 4,6 9,7	15,1 4,2 9,7	14,3 3,9 9,1	13,4 4,7 9,0	13,3 4,2 8,8
M A I	M m Moy	18,4 6,2 12,3	16,5 7,1 11,8	17,7 6,7 12,2	17,0 6,7 11,9	16,3 6,9 11,6	16,4 6,4 11,4	15,9 6,8 11,3	14,3 7,5 10,9	15,6 7,4 11,5	15,3 6,6 10,9	14,3 7,4 10,8	14,0 7,1 10,5
J U I N	M m Moy	20,8 9,1 15,0	18,6 9,8 14,2	20,4 9,8 15,1	19,4 9,3 14,4	18,5 9,6 14,1	18,0 9,3 13,7	20,3 9,8 15,0	17,9 10,9 14,4	19,6 10,6 15,1	18,9 10,0 14,4	18,1 10,7 14,4	17,8 10,2 14,0
J U I L	M m Moy	26,1 12,4 19,2	23,4 13,3 18,3	25,9 13,2 19,5	23,8 12,7 18,3	23,6 13,1 18,4	23,2 12,9 18,1	21,6 10,9 16,2	19,1 12,2 15,7	21,0 11,9 16,4	20,2 11,2 15,7	19,3 12,0 15,6	18,8 11,6 15,2
A O U T	M m Moy	22,9 11,1 17,0	20,4 12,1 16,3	22,0 12,0 17,0	20,6 11,7 16,2	20,7 11,9 16,3	20,3 11,5 15,9	20,6 11,7 16,1	18,3 12,6 15,5	19,7 12,4 16,0	18,9 12,0 15,5	18,3 12,4 15,4	18,1 12,2 15,1
S E P	M m Moy	18,8 8,9 13,8	16,5 9,8 13,2	17,6 9,7 13,6	17,2 9,4 13,3	17,2 9,6 13,4	16,3 9,4 12,8	18,1 9,4 13,7	15,9 10,6 13,2	16,9 10,2 13,5	16,4 9,9 13,1	16,2 10,3 13,3	15,9 10,3 13,1
O C T	M m Moy	16,1 7,7 11,9	14,3 8,7 11,5	15,3 8,5 11,9	15,0 8,1 11,6	14,3 8,2 11,2	14,2 8,1 11,2	15,0 7,4 11,2	13,1 8,2 10,7	13,8 7,9 10,9	14,0 7,4 10,7	12,9 7,8 10,4	12,7 7,7 10,2
N O V	M m Moy	6,9 1,0 3,9	6,1 1,7 3,9	6,6 1,4 4,0	6,7 1,4 4,1	5,9 1,4 3,7	5,6 1,3 3,5	5,7 2,6 4,2	4,9 2,1 3,5	5,3 2,0 3,6	5,7 1,7 3,7	4,6 1,9 3,3	4,7 1,9 3,3
D E C	M m Moy	1,8 -2,3 -0,2	1,4 -1,9 -0,2	1,7 -2,2 -0,2	2,1 -2,0 -0,0	1,4 -2,0 -0,3	1,4 -2,0 -0,3	1,0 -2,2 -0,6	0,7 -1,8 -0,5	0,9 -1,9 -0,4	1,4 -2,2 -0,4	0,5 -1,8 -0,6	0,5 -1,9 -0,6
ANNEE MOYEN NE	M m Moy	16,1° 6,2° 11,1°	14,5° 7,0° 10,7°	15,6° 6,8° 11,2°	14,9° 6,6° 10,8°	14,4° 6,8° 10,6°	14,1° 6,5° 10,3°	12,7 4,9 8,8	11,3 5,6 8,5	12,2 5,3 8,8	11,9 4,9 8,4	11,1 5,4 8,3	10,9 5,6 8,3

° Moyennes calculées sur 9 mois

TABLEAU ANNEXE N° 2

COMPARAISONS DES TEMPERATURES DE L'AIR DANS DIFFERENTS
TRAITEMENTS

Mois	Tempé- rature	1969						1970		
		Coupe rase	Coupe d'abri	Clairière	Pin Sylv.	Sapin de Vancouver	Epicéa	Coupe rase	Coupe d'abri	Clairière
J A N	Max	5,0	4,5	4,7	4,6	4,3	4,2	3,3	2,5	2,8
	Min	0,2	0,5	0,2	0,0	0,4	0,2	-1,6	-1,4	-1,5
	Moy	2,6	2,5	2,5	2,3	2,3	2,2	0,8	0,5	0,6
F E V	M	1,9	1,5	1,8	2,1	0,8	0,9	4,3	4,0	4,3
	m	-3,2	-2,9	-3,0	-3,5	-3,1	-3,2	-1,4	-1,1	-1,2
	Moy	-0,6	-0,7	-0,5	-0,7	-1,1	-1,1	1,4	1,4	1,5
M A R	M	8,0	7,6	8,1	7,6	6,7	6,6	6,2	5,4	5,9
	m	1,0	1,4	1,0	0,9	1,6	1,1	-0,4	-0,1	-0,4
	Moy	4,5	4,5	4,5	4,2	4,1	3,8	2,8	2,6	2,7
A V R	M	11,7	11,4	11,5	11,8	10,4	10,3	9,8	9,4	9,6
	m	4,2	4,7	4,3	3,7	4,6	4,3	3,1	3,5	3,4
	Moy	7,9	8,0	7,9	7,8	7,5	7,3	6,4	6,5	6,5
M A I	M	18,8	16,9	18,3	17,4	16,6	16,6	17,1	15,5	17,0
	m	8,0	8,7	8,3	7,9	8,5	8,1	7,1	7,7	7,5
	Moy	13,4	12,8	13,3	12,7	12,6	12,3	12,1	11,6	12,3
J U N	M	18,5	16,8	18,2	18,0	17,0	16,5	22,7	20,3	22,4
	m	9,4	9,9	9,8	9,8	9,7	9,6	11,8	12,7	12,6
	Moy	14,0	13,4	14,0	13,9	13,4	13,1	17,3	16,5	17,5
J U I	M	23,9	21,3	23,2	22,3	21,5	20,7	21,3	19,0	20,5
	m	13,3	14,0	13,9	13,9	13,8	13,4	11,1	12,1	11,9
	Moy	18,6	17,6	18,6	18,1	17,6	17,1	16,2	15,5	16,2
A O U	M	22,3	20,1	21,7	20,7	20,4	19,8	23,6	20,7	22,5
	m	11,8	12,7	12,4	12,4	12,6	12,2	11,5	12,6	12,3
	Moy	17,0	16,4	17,0	16,6	16,5	16,0	17,5	16,7	17,4
S E P	M	19,9	17,0	18,3	18,1	17,3	16,9	20,7	18,4	19,1
	m	9,8	10,6	10,4	10,3	10,3	10,1	9,0	10,0	9,9
	Moy	14,9	13,8	14,4	14,2	13,8	13,5	14,9	14,2	14,5
O C T	M	15,3	12,8	13,7	13,7	12,4	12,2	12,9	11,6	12,2
	m	5,3	6,0	6,0	5,5	5,9	5,5	6,4	7,0	6,8
	Moy	10,3	9,4	9,9	9,6	9,2	8,9	9,6	9,3	9,5
N O V	M	8,6	7,9	8,4				10,5	9,4	10,0
	m	2,1	2,7	2,6				3,5	4,1	3,8
	Moy	5,4	5,3	5,5				7,0	6,7	6,9
D E C	M	-0,9	-1,1	-0,9				2,6	1,9	2,3
	m	-4,4	-4,2	-4,4				-1,7	-1,3	-1,4
	Moy	-2,7	-2,7	-2,6				0,4	0,3	0,4
MOY ANNEE	Max.	14,5° 12,7	13,0° 11,4	13,9° 12,2	13,6°	12,7°	12,5°	12,9	11,5	12,4
	Min.	6,0° 4,8	6,6° 5,3	6,3° 5,1	6,1°	6,4°	6,1°	4,9	5,5	5,3
	Moy.	10,2° 8,8	9,8° 8,4	10,1° 8,7	9,9°	9,6°	9,3°	8,9	8,5	8,8

* Calculé sur 10 mois.

TABLEAU ANNEXE N° 3

COMPARAISON DES TEMPERATURES DE L'AIR DANS DIFFERENTS TRAITEMENTS

MOIS	TEMPERATURE	1971			MOYENNES SUR LA PERIODE 1967-1971		
		COUPE RASE	COUPE D'ABRI	CLAIRIERE	COUPE RASE	COUPE D'ABRI	CLAIRIERE
JANVIER	Maximum	3,5	2,6	3,0	3,6	2,9	3,2
	Minimum	- 4,1	- 3,6	- 3,7	- 2,0	- 1,6	- 1,7
	Moyen	- 0,3	- 0,4	- 0,3	0,8	0,6	0,8
FEVRIER	Max.	5,3	4,6	5,1	4,2	3,8	4,2
	Min.	- 0,6	- 0,3	- 0,5	- 1,4	- 1,0	- 1,2
	Moy.	2,3	2,1	2,2	1,4	1,4	1,5
MARS	Max.	6,6	6,4	6,8	7,7	7,3	7,7
	Min.	- 2,4	- 2,0	- 2,2	0,0	+ 0,3	- 0,1
	Moy.	2,1	2,1	2,3	3,8	3,8	3,8
AVRIL	Max.	17,4	16,7	17,7	13,5	13,0	13,4
	Min.	3,8	4,5	4,4	3,2	3,9	3,6
	Moy.	10,6	10,6	11,0	8,4	8,5	8,5
MAI	Max.	20,1	18,0	20,1	18,1	16,2	17,7
	Min.	8,4	9,4	9,2	7,3	8,1	7,8
	Moy.	14,2	13,7	14,7	12,7	12,1	12,8
JUIN	Max.	19,2	16,6	18,7	20,3	18,0	19,9
	Min.	9,4	10,3	10,3	9,9	10,7	10,6
	Moy.	14,3	13,5	14,5	15,1	14,4	15,3
JUILLET	Max.	25,6	21,8	25,2	23,7	20,9	23,2
	Min.	11,9	13,2	12,9	11,9	13,0	12,8
	Moy.	18,7	17,5	19,1	17,8	17,0	18,0
AOUT	Max.	23,7	20,7	22,2	22,6	20,0	21,6
	Min.	11,6	13,1	12,8	11,5	12,6	12,4
	Moy.	17,7	16,9	17,5	17,0	16,3	17,0
SEPT.	Max.	19,5	16,9	18,2	19,4	16,9	18,0
	Min.	6,9	8,3	8,0	8,8	9,9	9,6
	Moy.	13,2	12,6	13,1	14,1	13,4	13,8
OCTOBRE	Max.	16,4	14,4	15,3	15,1	13,2	14,1
	Min.	4,0	4,9	4,8	6,2	7,0	6,8
	Moy.	10,2	9,6	10,1	10,7	10,1	10,5
NOV.	Max.	6,3	5,4	6,0	7,6	6,7	7,3
	Min.	0,2	0,7	0,5	1,9	2,3	2,1
	Moy.	3,3	3,0	3,3	4,8	4,5	4,7
DEC.	Max.	5,2	4,3	4,7	1,9	1,4	1,7
	Min.	- 0,1	0,1	0,0	- 2,1	- 1,8	- 2,0
	Moy.	2,5	2,2	2,3	- 0,1	- 0,2	- 0,2
ANNEE	Max.	14,0	12,4	13,6	13,1	11,7	12,7
	Min.	4,1	4,9	4,7	4,6	5,3	5,1
MOYENNE	Moy.	9,0	8,6	9,2	8,9	8,5	8,9

TABLEAU ANNEXE N° 4
COMPARAISON DES INDICES ACTINOTHERMIQUES MOYENS DANS DIFFERENTES SITUATIONS (1967)

Situation	Hauteur en cm	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année *
Abies grandis	40				1,7	6,2	9,2	12,5	11,3	9,2	7,8	1,1	- 2,2	6,3
Picea abies	40				1,7	6,4	9,0	12,3	11,4	9,1	8,0	1,4	- 2,0	6,4
Pinus sylvestris	40				1,4	6,1	8,9	12,2	11,0	8,9	7,9	1,2	- 2,2	6,2
Coupe rase	20				0,0	5,2	8,2	11,7	9,9	7,0	5,6	- 0,3	- 3,9	4,8
	40						9,9	11,4	10,2	7,2	5,6	0,0	- 3,5	-
Coupe d'abri	20				1,3	6,5	9,3	12,7	11,5	9,3	8,0	1,0	- 2,9	6,3
	40						10,8	12,6	11,2	9,4	8,0	1,2	- 2,8	-
Clairière Nord	20				0,9	6,5	9,2	12,3	11,2	8,9	7,9	1,0	- 3,1	6,1
	40				0,6	5,9	8,8	12,2	11,0	8,8	7,4	0,6	- 3,3	5,8
Clairière Sud	20				0,5	5,9	9,0	12,2	11,1	8,9	7,7	0,8	- 3,4	5,9
	40				0,8	6,2	9,0	12,3	11,2	8,9	7,6	0,7	- 3,3	5,9
Clairière Est	20				0,9	6,3	9,1	12,7	11,5	9,3	8,0	0,9	- 3,0	6,2
Clairière Centre	20				0,7	6,2	9,2	12,3	11,4	8,9	7,4	0,6	- 3,3	5,9
	40						10,5	12,6	11,5	9,3	7,8	2,3	- 2,4	-
Clairière Ouest	20				1,0	6,4	9,3	12,7	11,5	9,3	7,9	0,9	- 2,9	6,2

* Moyennes sur 9 mois

TABLEAU ANNEXE N° 5
COMPARAISON DES INDICES ACTINOTHERMIQUES MOYENS DANS DIFFERENTES SITUATIONS (1968)

Situation	Hauteur en cm	Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Abies grandis	40	-2,8	-0,6	0,7	3,6	6,3	9,7	11,0	11,5	9,5	7,2			-
Picea abies	40	-2,6	-0,8	0,8	3,6	6,3	9,6	10,9	11,7	9,8	7,4			
Pinus sylvestris	40	-2,8	-0,5	0,5	3,4	6,3	9,4	10,8	11,6	9,5	7,3	1,6	-2,3	4,6
Coupe rase	20	-2,8	-2,8	-1,9	1,0	4,6	7,3	8,8	9,2	6,8	5,2	-0,2	-3,5	2,6
	40	-3,5	-1,9	-1,1	1,4	4,8	7,5	8,9	9,3	7,3	5,6	-0,1	-3,5	2,9
Coupe d'abri	20	-3,2	-1,3	-0,4	2,8	6,1	9,6	10,9	11,6	9,3	7,2	1,1	-2,9	4,2
	40	-3,0	-1,3	-0,3	2,8	6,1	9,7	10,8	11,6	9,4	7,2	1,1	-2,8	4,3
Clairière Nord	20	-3,2	-1,5	-0,8	2,3	6,0	9,4	10,6	11,5	9,4	7,4	1,5	-2,6	4,2
	40	-3,9	-1,3	-0,2	2,5	6,1	9,1	10,5	11,4	8,8	6,5	-0,7	-3,1	3,9
Clairière Sud	20	-3,5	-1,8	-1,0	2,2	5,5	9,0	10,1	10,9	9,0	7,0	0,7	-3,2	3,7
	40	-4,1	-1,5	-0,5	2,4	5,9	9,3	10,5	11,4	9,2	7,1	0,9	-2,9	4,0
Clairière Est	20	-3,3	-1,3	-0,2	2,7	6,1	9,8	11,0	11,7	9,5	7,5	-1,3	-2,7	4,3
	40					5,7	9,0	10,4	11,2	8,8	6,8	0,8	-2,9	-
Clairière Centre	20	-2,9	-1,7	-1,0	2,0	5,6	9,3	10,5	11,2	8,6	6,5	0,6	-3,0	3,8
	40	-3,2	-1,3	-0,4	2,6	5,9	9,4	10,7	11,5	9,3	7,1	0,9	-3,0	4,1
Clairière Ouest	20	-3,3	-1,3	-0,3	2,7	6,1	9,7	10,9	11,7	9,6	7,3	0,9	-2,8	4,3
	40					5,8	9,1	10,5	11,2	9,0	6,9	0,8	-3,0	-

TABLEAU ANNEXE N° 6

COMPARAISON DES INDICES ACTINOTHERMIQUES DANS DIFFERENTES SITUATIONS (1969)

Situation	Hauteur en cm	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Abies grandis	40	-0,2	-3,8	0,8	3,5	7,8	13,1	13,1	11,7	9,4	5,0			-
Picea abies	40	-0,1	-3,7	0,7	3,4	7,5	9,0	12,8	11,5	9,6	5,0			-
Pinus sylvestris	40	-0,2	-4,0	0,7	3,2	7,4	8,8	12,8	11,4	9,4	4,8			-
Coupe rase	20	-1,1	-5,3	-0,6	2,2	5,9	7,3	10,8	8,7	6,2	1,6	-0,4	-5,5	2,5
	40	-1,0	-5,0	-0,3	2,4	6,2	7,6	11,1	9,6	7,2	2,4	0,0	-5,4	2,9
Coupe d'abri	20	-0,9	-5,1	-0,2	2,7	7,7	9,2	13,1	11,9	9,5	5,1	1,2	-4,8	4,1
	40	-0,7	-4,6	-0,1	3,0	7,7	9,2	13,1		9,5	5,1	1,2	-4,9	-
Clairière Nord	20	-0,3	-4,3	0,1	2,9	7,1	8,8	12,8	11,1	9,2	4,6	0,6	-5,2	4,0
	40	-0,9	-4,9	-0,5	2,4	6,9	8,6	12,5	11,1	8,8	4,5	0,7	-5,1	3,7
Clairière Sud	20	-1,0	-5,3	-0,7	2,3	6,5	8,2	12,2	10,5	8,5	4,1	0,2	-5,2	3,4
	40	-0,9	-4,9	-0,3	2,6	7,1	8,5	12,5	11,2	9,0	4,8	0,9	-5,2	3,8
Clairière Est	20	-0,5	-4,7	-0,1	2,8	7,6	9,0	13,0	11,6	9,5	5,1	1,0	-5,0	4,1
	40	-0,9	-4,9	-0,4	2,3	6,9	8,3	12,3	10,7	8,6	4,4	0,7	-5,1	3,6
Clairière Centre	20	-0,9	-5,0	-0,4	2,5	7,1	8,6	12,5	10,8	8,8	4,5	0,6	-5,1	3,7
	40	-0,7	-4,7	-0,3	2,5	6,9	8,4	12,5		8,6	4,3	0,6	-5,2	-
Clairière Ouest	20	-0,7	-4,7	-0,2	2,8	7,4	8,9	12,8	11,5	9,3	4,8	0,9	-5,1	4,0
	40	-0,9	-4,8	-0,4	2,5	7,1	8,8	12,6	11,1	8,9	4,5	1,0	-5,2	3,8

TABLEAU ANNEXE N°7

COMPARAISON DE LA PLUVIOMETRIE (mm) DANS LA CLAIRIERE ET DANS
LA COUPE RASE

Année	Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Année
1967	Clairière Nord				35,0	82,2	45,0	56,2	94,2	135,2	97,3	58,5	65,0	668,6
	Clairière Sud				34,5	79,3	44,5	55,0	94,7	128,2	92,1	55,0	62,5	645,8
	Clairière Est				35,5	82,5	45,1	54,6	96,2	129,3	96,4	57,9	64,0	661,5
	Clairière Ouest				31,1	71,9	40,5	50,5	79,1	115,0	75,1	51,4	52,0	566,6
	Coupe rase				36,6	85,2	45,4	55,7	97,5	136,5	99,8	59,5	65,0	681,2
1968	Clairière Nord	41,5	63,0	43,4	75,8	54,9	47,7	104,2	144,1	105,4	38,1	24,1	58,6	800,8
	Clairière Sud	41,8	63,0	42,5	77,3	54,3	48,3	106,3	142,7	106,1	38,3	23,3	58,7	802,6
	Clairière Est	42,5	63,5	45,7	79,4	54,8	48,2	108,2	145,7	106,5	39,7	24,9	59,5	818,6
	Clairière Ouest	37,5	59,0	32,0	74,5	51,6	46,7	102,4	145,0	102,5	34,8	21,5	56,6	764,1
	Coupe rase	40,9	64,6	45,8	78,3	55,2	48,5	108,0	147,1	106,8	39,1	24,8	60,4	519,5
1969	Clairière Nord	36,1	51,8	85,3	84,9	82,0	128,3	28,4	69,8	32,4	5,4	99,3	50,6	754,3
	Clairière Sud	35,9	51,2	84,2	84,8	82,5	127,3	28,3	70,3	32,1	5,3	99,5	52,1	753,5
	Clairière Est	36,8	50,7	86,8	86,7	83,6	131,8	29,0	73,1	32,1	5,5	106,1	52,1	774,3
	Clairière Ouest	35,0	48,8	76,4	77,0	77,6	114,5	25,2	67,9	31,8	5,2	90,7	49,2	699,3
	Coupe rase	36,5	50,4	88,4	87,1	84,2	129,1	28,7	73,9	33,8	5,6	105,4	52,0	775,1
1970	Clairière Nord	74,3	145,3	65,8	87,2	127,0	122,7	55,3	67,4	79,7	64,1	39,2	40,5	968,5
	Clairière Sud	73,7	143,2	67,1	90,4	74,2	121,9	57,6	67,5	79,2	65,1	39,1	39,7	918,7
	Clairière Est	74,9	150,4	69,0	92,2	133,4	124,6	58,9	68,2	82,9	65,5	41,8	41,8	1003,6
	Clairière Ouest	72,8	129,5	57,3	81,8	103,7	111,3	40,1	62,9	76,5	61,0	34,4	37,7	869,0
	Coupe rase	76,0	155,6	70,1	95,0	133,5	125,8	57,2	70,3	79,8	66,4	42,9	41,6	1014,2
1971	Clairière Nord	40,5	15,1	31,5	25,6	80,6	139,5	46,7	115,1	26,4	22,3	67,5	16,1	626,9
	Clairière Sud	40,4	14,9	31,0	25,5	80,6	141,4	46,0	116,0	22,9	20,9	70,5	16,4	626,5
	Clairière Est	42,3	15,3	31,6	25,6	80,8	140,5	46,8	116,7	23,2	20,3	72,1	16,8	632,0
	Clairière Ouest	38,0	15,1	29,0	24,4	68,7	132,2	42,1	95,6	20,5	18,7	66,1	14,4	564,8
	Coupe rase	42,4	15,8	33,4	25,1	80,2	140,4	47,5	119,6	21,9	21,5	74,0	16,1	637,9

PHOTOGRAPHIE N° 1. ETUDE MICROCLIMATIQUE
D'UN PEUPLEMENT DE Hêtres SYLVESTRE.
VUE GENERALE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL
(1966)



PHOTOGRAPHIE N° 2. MESURE DES PRECIPITATIONS
AU SOL (P_s) ET DE L'ECOULEMENT
LE LONG DES TRONCS (P_t) FORET DE HAYE (I)
(1970)



PHOTOGRAPHIE N° 3. MESURE DES PRECIPITATIONS
AU SOL (P_s) ET DE L'ECOULEMENT
LE LONG DES TRONCS (P_t) FORET D'AMANCE
(1969)



PHOTOGRAPHIE N° 4. VUE DETAILLEE DU
DISPOSITIF DE MESURE DE L'ECOULEMENT
LE LONG DES TRONCS. FORET DE BELLEFAY
(1972)

PHOTOGRAPHIE n° 5. Exemple d'enracinement de quelques espèces forestières
(d'après KOSTLER et al. 1968)

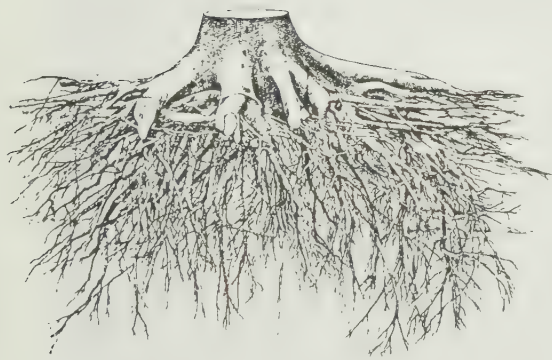
Fagus silvatica



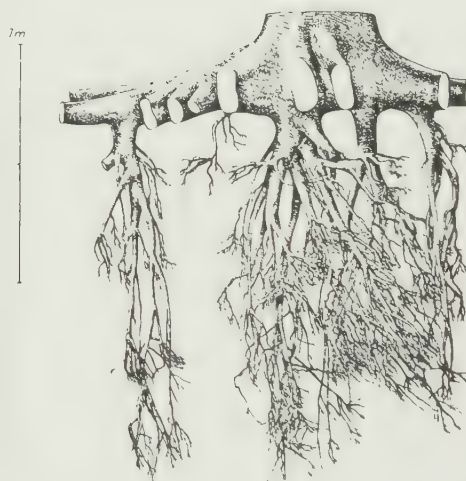
Quercus sessiliflora



Tilia cordata



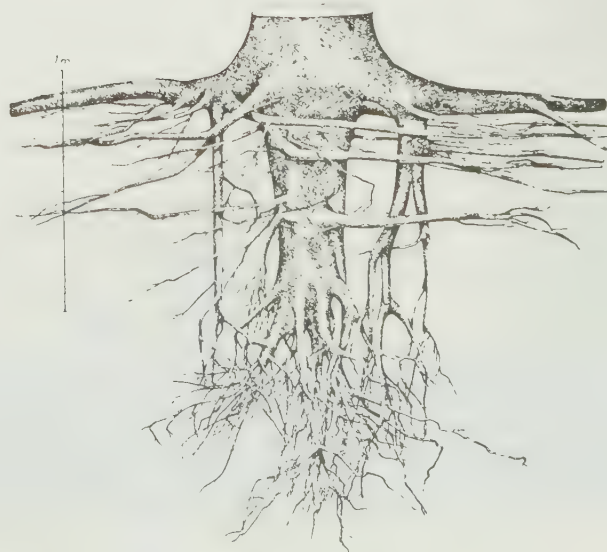
Picea abies



Pseudotsuga menziesii



Pinus silvestris



PHOTOGRAPHIE N° 6. COMPARAISON DE L'ETAT VEGETATIF ET DE LA
CROISSANCE DE ABIES ALBA (ECOUVES) DANS LES
3 MILIEUX ETUDIES (1971)

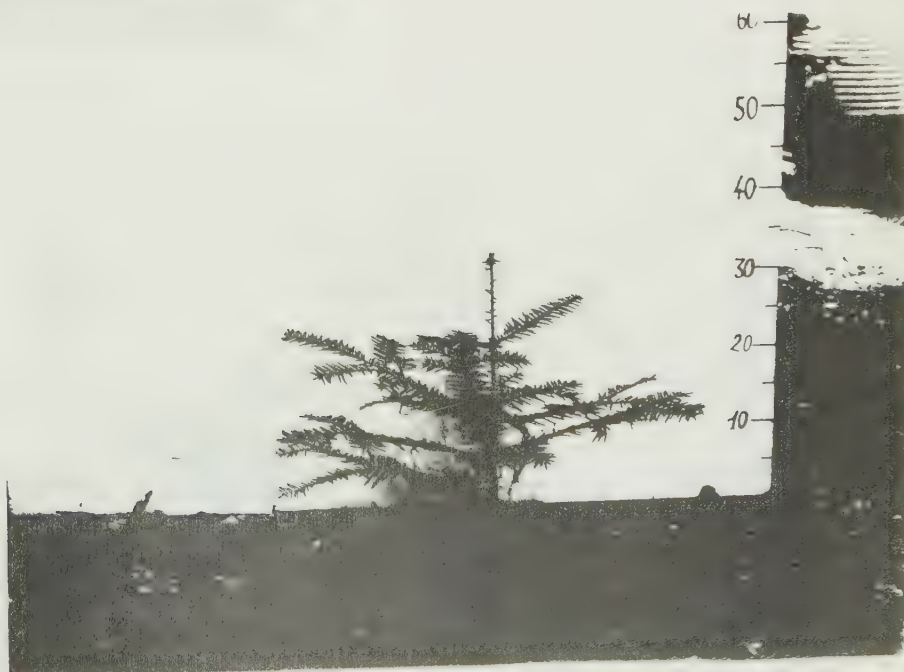
COUPE RASE

(Remarquer la dissymétrie
du feuillage due aux
effets des gelées tardives)



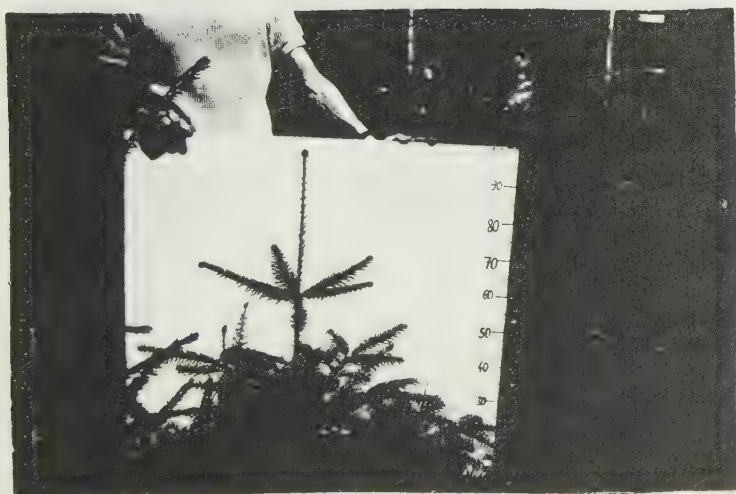
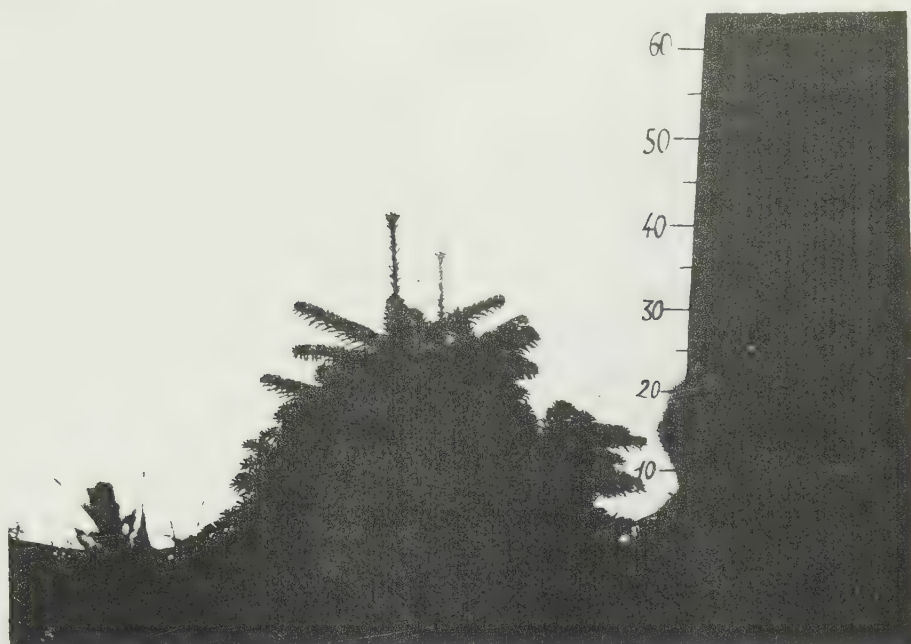
CLAIRIERE

COUPE D'ABRI



PHOTOGRAPHIE N° 7. COMPARAISON DE L'ETAT VEGETATIF ET DE LA
CROISSANCE DE ABIES NORDMANNIANA DANS LES
3 MILIEUX ETUDIES (1971)

COUPE RASE



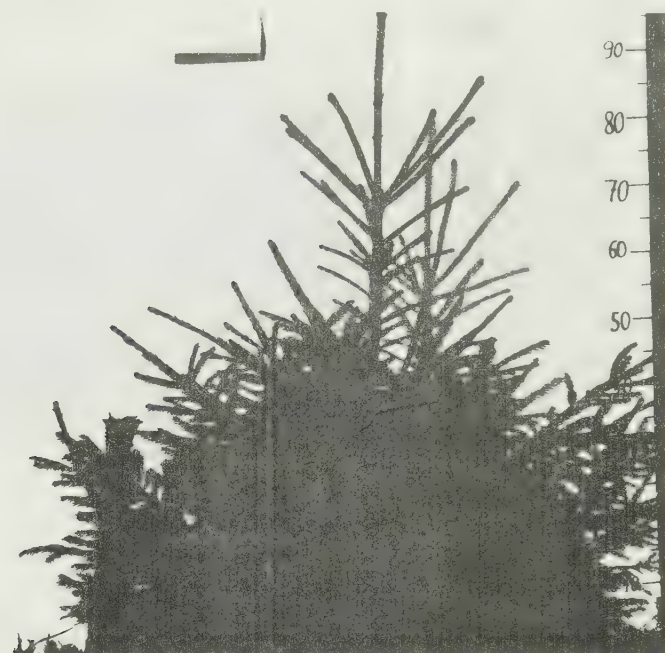
CLAIRIERE

COUPE D'ABRI

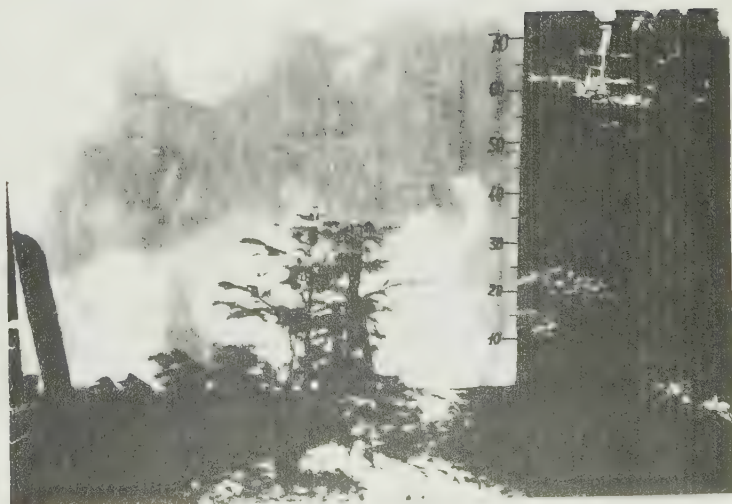


PHOTOGRAPHIE N° 8. COMPARAISON DE L'ETAT VEGETATIF ET DE LA
CROISSANCE DE PICEA ABIES DANS LES
3 MILIEUX ETUDIES.

COUPE RASE



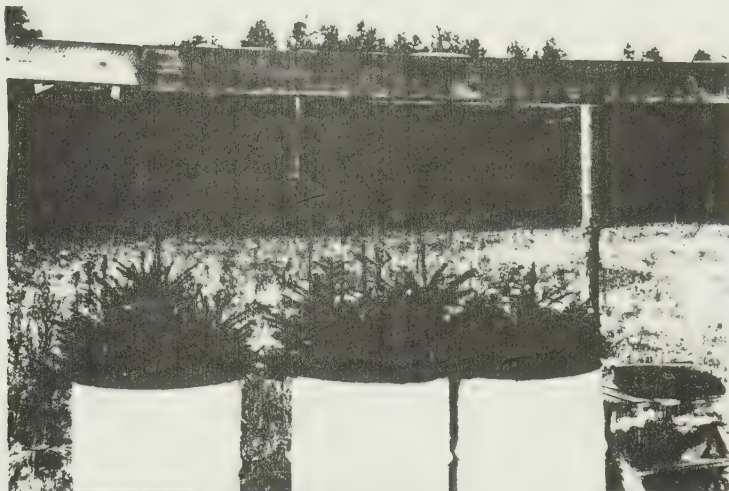
CLAIRIERE



COUPE D'ABRI

PHOTOGRAPHIE N° 9. VUE GENERALE DES CASES DE VEGETATION
avec PICEA ABIES.

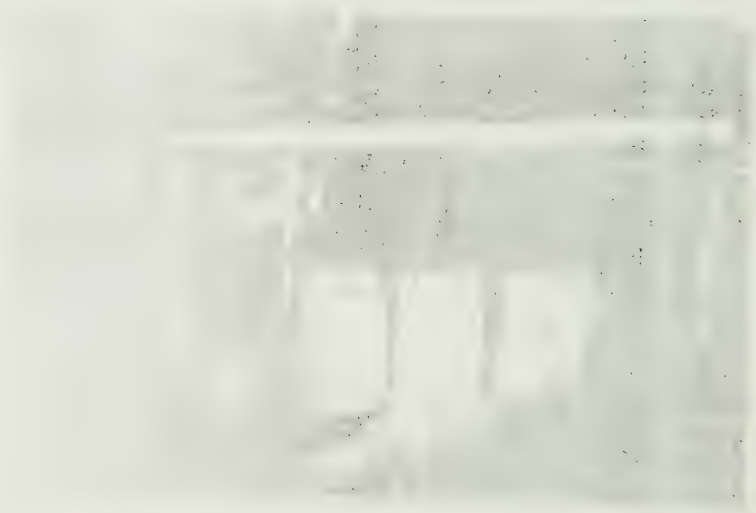
COUPE RASE



CLAIRIERE

COUPE D'ABRI

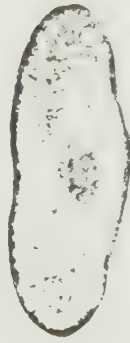




THE JOURNAL OF THE
ROYAL ANTHROPOLOGICAL INSTITUTE

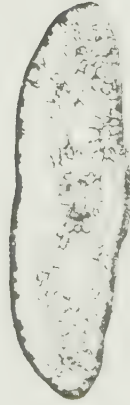
THE JOURNAL OF THE
ROYAL ANTHROPOLOGICAL INSTITUTE

Abies alba

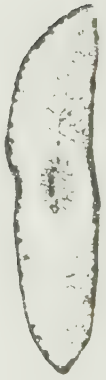


Plein
découvert

Abies
nordmanniana



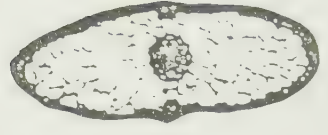
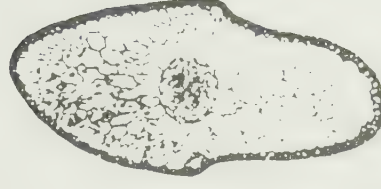
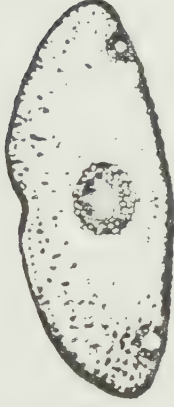
Clairière



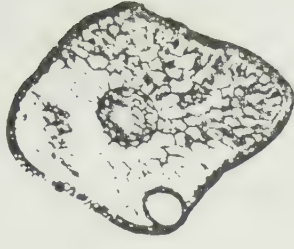
Coupe
d'abri



Pseudotsuga
menziesii



Picea abies



NOM DE L'ETUDIANT : AUSSINAC Gilbert

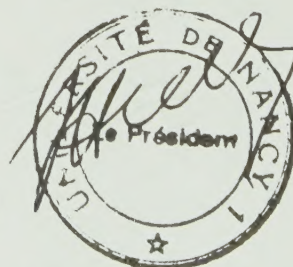
NATURE DE LA THESE : DOCTORAT D'ETAT ES SCIENCES

VU, APPROUVE

& PERMIS D'IMPRIMER

NANCY, le 13 mai 1975

LE PRESIDENT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I



J.R. HELLUY

